

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL MÉTODO DE SULFITACIÓN FRENTE AL
EMPLEO DE PERÓXIDO DE HIDROGENO EN EL PROCESO DE
DECOLORACIÓN DE MELADURA EN EL INGENIO RISARALDA S.A.**

DIANA MARIA FLÓREZ GÁLVEZ

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL
PEREIRA
2007**

**EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL MÉTODO DE SULFITACIÓN FRENTE AL
EMPLEO DE PERÓXIDO DE HIDROGENO EN EL PROCESO DE
DECOLORACIÓN DE MELADURA EN EL INGENIO RISARALDA S.A.**

DIANA MARIA FLÓREZ GÁLVEZ

Director:
MELVIN DURAN
Docente Universidad Tecnológica de Pereira

Asesor:
MABEL STELLA FERREIRA O.
Jefe Elaboración y Refinería
Ingenio Risaralda S.A.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
PROGRAMA DE QUÍMICA INDUSTRIAL
PEREIRA
2007

CONTENIDO

1. OBJETIVOS	11
1.1. OBJETIVO GENERAL	11
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	11
2. JUSTIFICACIÓN	12
3. MARCO TEORICO	14
3.1. OBTENCION DE AZUCAR	14
3.2. EL AZUCAR	18
3.3. DESARROLLO DEL COLOR	19
3.3.1. Materiales coloreados provenientes de la caña	20
3.3.1.1. No-Azúcares coloreados existentes originalmente en la caña	20
3.3.1.2. No – Azúcares de la caña que pueden desarrollar un color	21
3.3.1.3. No-azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar.	22
3.4. EFECTO DEL PH EN EL COLOR	22
3.5. CAMBIOS DE COLOR EN LA PRÁCTICA	23
3.5.1. Oscurecimiento del jugo de la caña	23
3.5.2. Color en el azúcar crudo	23
3.5.3. Desarrollo del color en el procesamiento del azúcar crudo de caña	23
3.5.4. Desarrollo del color en al azúcar blanco	24
3.6. SEPARACIÓN DEL COLOR DE LOS PRECIPITADOS Y ADSORBENTES	24

3.7. MÉTODO MÁS EMPLEADO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN PRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR	24
3.7.1. Proceso de sulfitación	24
3.7.2. Azufre	25
3.7.3. Gas del quemador de azufre. Dióxido de Azufre	25
3.7.4. Hornos de quemadores de azufre	25
3.7.5. Torre de sulfitación	27
3.7.6. Dióxido de Azufre (SO ₂)	28
3.7.6.1. Descripción	28
3.7.6.2. Estructura molecular	29
3.7.6.3. Principales usos	29
3.7.6.4. El problema medioambiental de los óxidos de azufre	30
3.7.7. Tipos de sulfitación	33
3.7.7.1. Sulfitación en frío	34
3.7.7.2. Sulfitación después de alcalinizar	34
3.7.7.3. Sulfitación en caliente	34
3.7.7.4. La sulfitación continua	34
3.7.7.5. Procedimientos fraccionados	34
3.7.7.6. La sulfitación del jarabe	34
3.7.8. Aspectos positivos de la sulfitación	35
3.7.9. Aspectos negativos de la sulfitación	36
3.8. MÉTODO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN EVALUACIÓN	36
3.8.1. Compuestos de oxígeno	36

3.8.2.	Obtención del peróxido de hidrógeno	40
3.8.2.1.	Preparación industrial	41
3.8.2.1.1.	Método de la oxidación del isopropanol	41
3.8.2.1.2.	Método de la oxidación electroquímica del H_2SO_4 o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	41
3.8.2.1.3.	Proceso de la antraquinona (el más importante)	42
3.8.3.	Toxicidad	43
3.8.4.	Aplicaciones del Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2)	44
3.8.5.	Ventajas	45
4.	MARCO DE REFERENCIA	47
4.1.	MARCO GEOGRÁFICO	47
4.2.	TIPO DE ESTUDIO	47
4.3.	ANTECEDENTES	47
5.	DESARROLLO METODOLÓGICO	49
5.1.	PUNTOS DE MUESTREO	49
5.2.	TOMA DE MUESTRAS	49
5.3.	PROCESOS INDUSTRIALES DE CLARIFICACION	52
5.3.1.	Clarificacion con SO_2 en el Ingenio Risaralda S.A.	52
5.3.1.1.	Insumos	52
5.3.1.2.	Especificaciones de los equipos	52
5.3.1.3.	Procedimiento	52
5.3.2.	Clarificacion con Peróxido de Hidrógeno 50% (prueba en planta)	53
5.3.2.1.	Insumos	53

5.3.2.2.	Equipos y materiales	54
5.3.2.3.	Procedimiento	54
5.4.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS	56
5.4.1.	Equipos	56
5.4.2.	Material de vidrio	56
5.4.3.	Reactivos	56
5.4.4.	Otros implementos de laboratorio	57
5.4.5.	Equipos de Protección Personal	57
5.5.	ANALISIS DE LABORATORIO	57
5.5.1.	Determinación de pH en meladura (Método 7)	57
5.5.2.	Determinación de Grados Brix (Método 1123)	58
5.5.3.	Determinación de sacarosa (Método 1127).	59
5.5.4.	Ensayo para determinar el color y la turbiedad en meladura (Método 1147)	59
5.5.5.	Determinación de Dióxido de Azufre (SO ₂) en miel virgen (Método 1121)	61
5.5.6.	Determinación de Peróxido de Hidrogeno (H ₂ O ₂) residual	63
5.5.7.	Contenido de ceniza en azúcar crudo (NTC 570).	63
6.	DATOS, RESULTADOS Y DISCUSION	65
6.1.	SULFITACION CONTINUA	65
6.2.	PEROXIDO DE HIDROGENO 50% wt.	70
6.2.1.	Prueba # 1: dosificación 200 ml/min	70
6.2.2.	Prueba # 2: dosificación 170 ml/min	72
7.	CONCLUSIONES	78

8. RECOMENDACIONES	80
9. BIBLIOGRAFÍA	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de producción de azúcar	15
Figura 2. Molécula de sacarosa	18
Figura 3. Horno quemador de azufre del Ingenio Risaralda S.A.	26
Figura 4. Torre de sulfitación del Ingenio Risaralda S.A.	27
Figura 5. Vista completa del horno quemador de azufre y la torre de sulfitación del Ingenio Risaralda S.A.	28
Figura 6. Geometría molecular del Peróxido de Hidrogeno	37
Figura 7. Diagrama de Frost	39
Figura 8. Obtención de Peróxido de Hidrogeno empleando antraquinona	42
Figura 9. Punto de muestreo Evaporador No.6	49
Figura 10. Vista completa evaporador Ingenio Risaralda S.A.	50
Figura 11. Punto de muestreo salida clarificador de meladura	51
Figura 12. Tanque clarificador de meladura Ingenio Risaralda S.A.	51
Figura 13. Tambor de 72 kg.	53
Figura 14. Bomba peristáltica	54
Figura 15. Tanque de reacción contiguo al tanque clarificador de meladura	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Diez mayores productores del azúcar mundial	16
Gráfico 2. Producción de azúcar en Latinoamérica y el Caribe	18
Gráfico 3. Variación de color y turbiedad de meladura cruda	66
Gráfico 4. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada	67
Gráfico 5. Comparativo de color y turbiedad entre meladura sin clarificar y meladura clarificada	68
Gráfico 6. Variación de color y turbiedad de meladura cruda	71
Gráfico 7. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada	72
Gráfico 8. Variación de color y turbiedad de meladura cruda	73
Gráfico 9. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada	74
Gráfico 10. Esquema comparativo de la efectividad del H ₂ O ₂ a diferentes flujos	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diez mayores productores del azúcar mundial	16
Tabla 2. Producción de azúcar en Latinoamérica y el Caribe	17
Tabla 3. Oxidación Peróxido de Hidrogeno	38
Tabla 4. Agentes oxidantes más empleados en la industria	45
Tabla 5. Datos de meladura cruda	65
Tabla 6. Datos de meladura después de ser sulfitada y clarificada	66

Tabla 7. Datos comparativos de color y turbiedad en meladura sin clarificar y meladura clarificada	68
Tabla 8. Datos de sacarosa y pureza en meladura	69
Tabla 9. Promedio mensual de color, turbiedad y cenizas en azúcar crudo	70
Tabla 10. Datos obtenidos durante la prueba en planta con peróxido de hidrogeno (200 ml/min) en el Ingenio Risaralda	70
Tabla 11. Datos obtenidos durante la prueba en planta con peróxido de hidrógeno (170 ml/min) en el Ingenio Risaralda	73
Tabla 12. Cuadro comparativo de la efectividad de H ₂ O ₂ a diferentes dosificaciones en la meladura	74
Tabla 13. Datos de sacarosa y pureza en meladura	76
Tabla 14. Datos de color, turbiedad y cenizas en azúcar crudo	76
Tabla 15. Cuadro comparativo de métodos de clarificación de meladura	77

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la efectividad del método de Sulfitación, que ha sido por muchos años el más efectivo, frente al uso de Peróxido de Hidrógeno; en el proceso de decoloración de meladura para la obtención de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar los aspectos positivos y negativos de ambos métodos durante el proceso de obtención de azúcar.
- Determinar la viabilidad del empleo de Peróxido de Hidrógeno desde aspectos como: economía, efectividad, aplicabilidad y seguridad.
- Analizar la efectividad de la decoloración en la meladura aplicando ambos métodos, sustentando con resultados de teoría y análisis llevados a cabo a nivel industrial.

2. JUSTIFICACIÓN

El ingenio Risaralda lleva 29 años prestando sus servicios a la comunidad y cada día quiere innovar con nuevos productos y tecnología el mercado nacional e internacional por tal razón busca mejorar tratando de implementar nuevos métodos y productos que tengan menor impacto en el proceso.

La caña de azúcar ha sido sin lugar a dudas uno de los productos de mayor importancia para el desarrollo comercial en el continente americano y europeo. El azúcar se consume en todo el mundo, puesto que es una de las principales fuentes de calorías en las dietas de todos los países.

El azúcar puede obtenerse principalmente a partir de la caña de azúcar y la remolacha azucarera. Para su obtención se requiere de un largo proceso, desde que la semilla de caña germina hasta que el azúcar se comercializa nacional e internacionalmente.

Durante el proceso de producción de azúcar se obtienen subproductos de características directamente influenciados por la calidad de los materiales y procesos empleados. En la caña de azúcar se encuentran sustancias coloreadas al igual que en todas las plantas cultivadas, su carácter depende, hasta cierto punto, del tipo de la caña, del suelo, de las condiciones de cultivo, del área geográfica y de los procesos de molienda y refinación empleados.

En la molienda de la caña se extraen dichas sustancias formando parte del jugo y constituyen una porción de los no-azúcares que luego van a obstaculizar el proceso de la extracción de azúcar. Adicionalmente en los procesos siguientes para la obtención del azúcar, se forman otras sustancias de color como resultado de las reacciones químicas que ocurren entre algunos de los no-azúcares que ya están presentes o que se originan en el proceso.

En el jugo de caña se encuentra que aproximadamente el 17% son no-azúcares orgánicos y tan solo el 1% representa la cantidad de materia coloreada, entre los compuestos más notables que al reaccionar con otros compuestos producen un aumento en el color se encuentran los Poli fenoles y los Amino compuestos. Sin embargo, a causa de su intensidad tienen un efecto muy pronunciado en la apariencia del jugo o del azúcar.¹

La producción de azúcar con coloraciones fuera de los límites establecidos puede ocasionar grandes pérdidas económicas para la empresa.

¹ HONIG, Pieter. Principios de tecnología azucarera. Tomo 1. Editorial Continental S.A. 1969.

Para eliminar o reducir dicho problema en el Ingenio Risaralda S.A., se emplea normalmente la sulfitación de jugo y meladura, que consiste en bombear el jugo o meladura en contracorriente con Dióxido de Azufre (SO_2).

Aunque los resultados son positivos para el producto en proceso, hay un aumento de las incrustaciones en calentadores y evaporadores, presencia de sulfitos en meladura y mieles, además de el contenido de ceniza en los azúcares crudos.

Teniendo en cuenta los anteriores aspectos, se buscó un método alternativo que elimine el color con la efectividad de la sulfitación. Este método consiste en aplicar Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2) 50% grado alimento a la meladura en el proceso de clarificación.

Su mecanismo de acción se debe a la efervescencia que produce, ya que la liberación de oxígeno destruye los microorganismos anaerobios estrictos, y el burbujeo de la solución cuando entra en contacto con los tejidos y ciertas sustancias químicas, expulsa restos tisulares fuera del conducto.

Los beneficios del producto se evaluarán durante las pruebas y se espera aumentar la remoción de color, disminuir el contenido de cenizas del azúcar y reducir las incrustaciones en calentadores y evaporadores del Ingenio Risaralda.

3. MARCO TEORICO

3.1. OBTENCION DE AZUCAR

El proceso para obtención de azúcar es básicamente descrito así:

La caña de azúcar se cultiva en terrenos previamente destinados y su periodo de cosecha oscila entre 12 y 15 meses. La caña es transportada desde el campo hasta la fábrica en tractomulas y vagones tirados por tractores que se descargan mediante grúa hilo en las mesas de caña procurando realizar una alimentación uniforme a las picadoras que cortan y desfibran la caña que alimenta los molinos, luego utilizando la presión ejercida por las mazas o rodillos dentados, se logra la extracción del jugo de la caña.

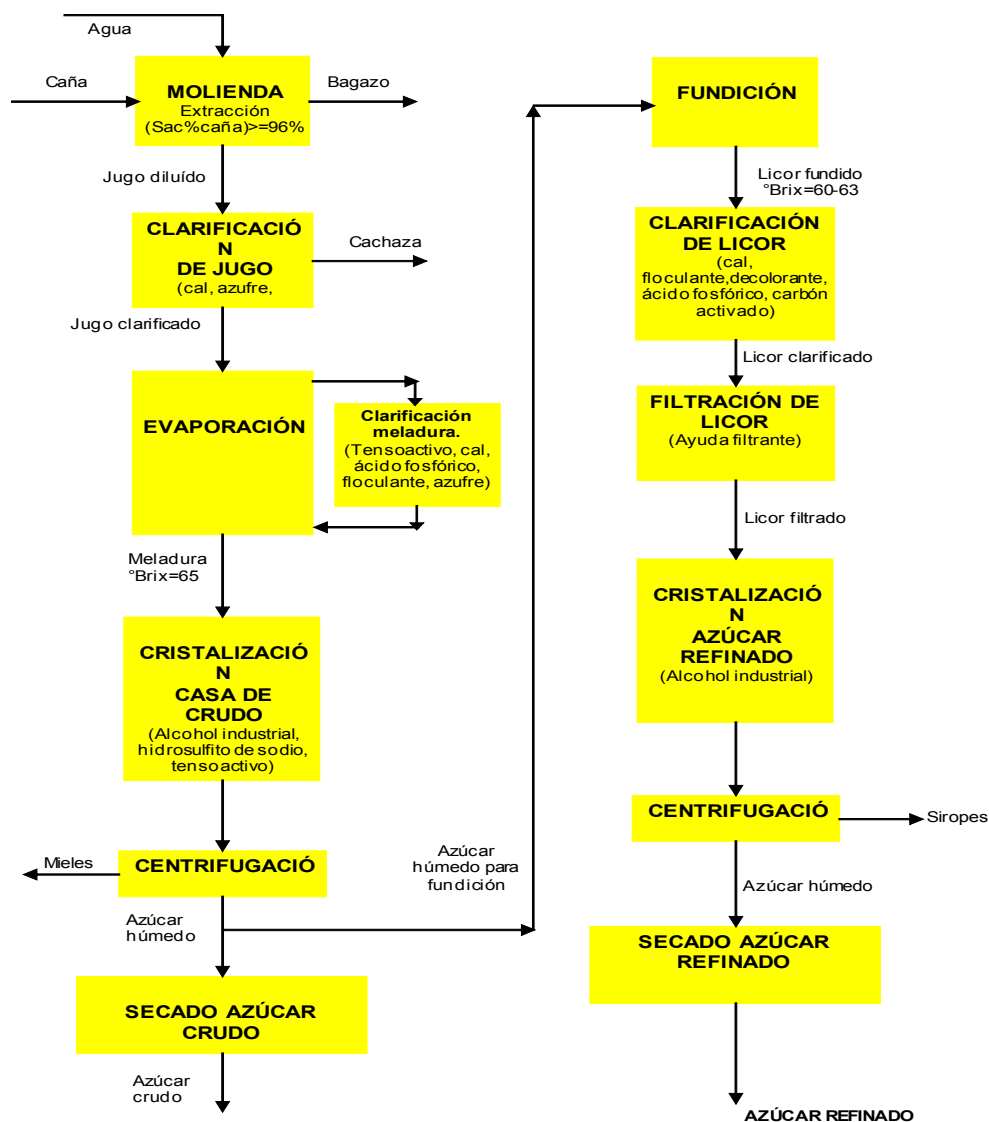
El jugo extraído en los molinos se conduce hacia purificación que consta de las etapas de: calentamiento, la sulfitación para eliminación sustancias coloreadas, la alcalización para minimizar perdidas de sacarosa y precipitar impurezas orgánicas e inorgánicas, la clarificación que separa azúcares y sustancias no útiles al proceso y por último la filtración. Por medio de estas operaciones, los insumos tales como Azufre (convertido a dióxido de azufre), lechada de cal y floculante forman puentes con las sustancias extrañas diferentes a la sacarosa presentes en el jugo que transmiten color y bajan la pureza del azúcar final, formándose moléculas más pesadas que sedimentan en los clarificadores de corto tiempo de retención.

El jugo que ha sido purificado se somete a sucesivas evaporaciones, eliminando gran parte del agua contenida en este (alrededor del 80%), resultando un material más denso llamado meladura.

La meladura se envía hacia los tachos al vacío, equipos donde se realiza la cristalización de la sacarosa. Una vez formados los cristales del tamaño y pureza deseados, se lleva hacia las centrífugas para separar la miel del azúcar. El azúcar libre de la miel se conduce hacia la secadora-enfriadora para eliminar la humedad ligada al cristal. El azúcar por último es almacenado en silos o tolvas para ser empacada.

Figura 1.

DIAGRAMA DE FLUJO: PROCESO DE PRODUCCIÓN DE AZÚCAR



La producción mundial de azúcar en el año 2001 (septiembre 2000 a agosto 2001) fue 130.615.770 toneladas métricas valor crudo (tmvc), de las cuales un 73% provinieron de la caña de azúcar y el 27% de la remolacha.

Tabla 1. Diez mayores productores del azúcar mundial

Los diez mayores productores acumularon el 71% del azúcar mundial.

PAIS	Toneladas Métricas Valor Crudo (tmvc)
Brasil BR	20.336.100
India IN	19.906.213
Unión Europea EU	15.500.157
Estados Unidos US	7.774.000
China CN	7.160.707
México MX	5.613.529
Tailandia TH	5.370.310
Australia AU	4.768.350
Cuba CU	3.747.794
Pakistán PK	2.719.584

Grafico 1. Diez mayores productores del azúcar mundial

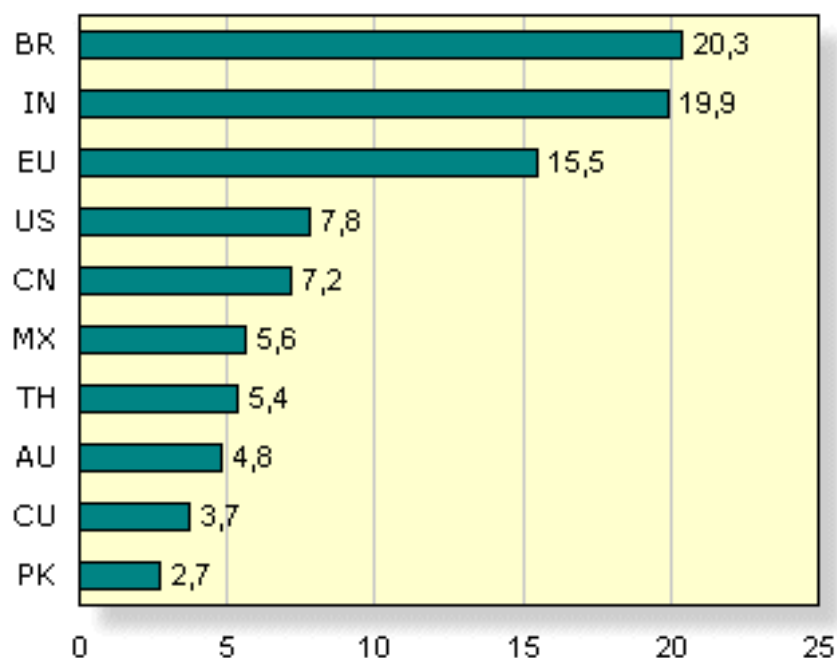
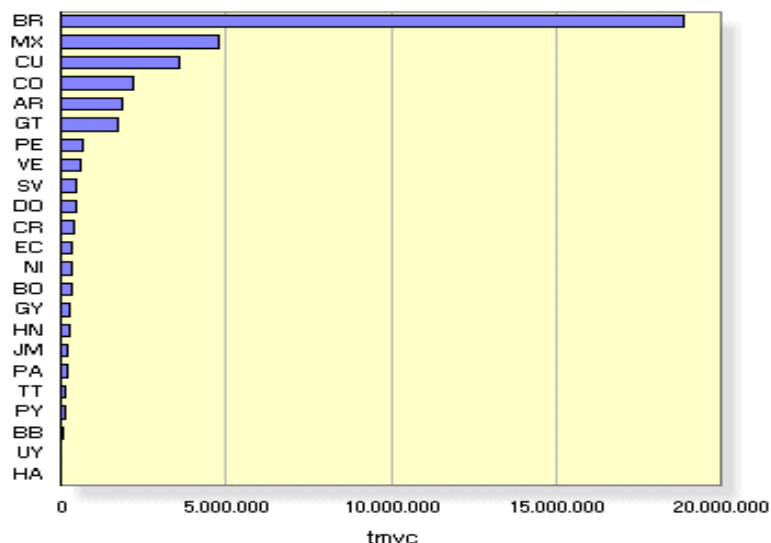


Tabla 2. Producción de azúcar en Latinoamérica y el Caribe

La producción de azúcar en Latinoamérica y el Caribe en millones de métricas valor crudo (tmvc) durante la zafra 1998-1999 fue:

PAIS	tmvc	PAIS	tmvc
Brasil	18.900.000	Ecuador	340.000
México	4.800.000	Nicaragua	335.000
Cuba	3.600.000	Bolivia	305.000
Colombia	2.200.000	Guyana	254.000
Argentina	1.850.000	Honduras	240.000
Guatemala	1.700.000	Jamaica	200.000
Perú	680.000	Panamá	180.000
Venezuela	600.000	Trinidad y Tobago	118.000
El Salvador	495.000	Paraguay	110.000
República Dominicana	465.000	Barbados	65.000
Costa Rica	375.000	Haití	3.000

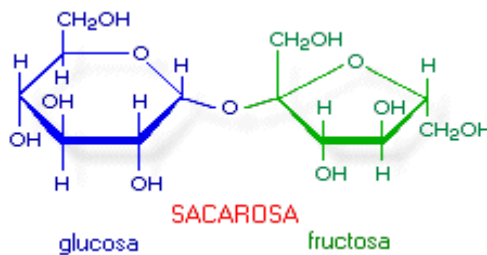
Grafico 2. Producción de azúcar en Latinoamérica y el Caribe



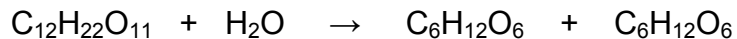
3.2. EL AZUCAR

El azúcar (sacarosa), es un carbohidrato de fórmula general $C_{12}H_{22}O_{11}$; un disacárido que consiste en dos compuestos monosacáridos: D-glucosa y D-fructosa.

Figura 2



Cuando se invierte la sacarosa, por la acción de un ácido o de una enzima, la molécula se divide dando glucosa y fructosa:



Esta reacción, a la que se llama hidrólisis o inversión, tiene efecto a diversas velocidades, que dependen de condiciones tales como la temperatura, el tiempo y el pH. Estos dos azúcares reductores desarrollan color cuando se les sujeta a condiciones de calor y pH alcalino. Si éstas son extremas, se destruirán los azúcares reductores formándose en la reacción varios productos, los que a su vez

se unen fácilmente con otros compuestos que ya antes estaban presentes o que también se originan en el proceso, y las sustancias resultantes son a menudo la fuente del color de los productos del jugo de la caña o del azúcar crudo.²

En las fábricas de azúcar se hace un extenso uso de los agentes químicos con objeto de conseguir ciertos cambios deseables en la naturaleza de los materiales procesados.

El propósito de varios procedimientos de purificación de jugos es convertir los jugos mezclados que son lodosos y de color verde oscuro, en jugos clarificados brillantes de color amarillo claro.

Para conseguir dicho resultado se utiliza tanto el color como algunas sustancias químicas cuya acción es precipitar aquellos no-azúcares que si no se eliminan del jugo, podrían interferir en contra de una eficiente separación de los cristales de sacarosa del licor madre. Podría pensarse que la elección de las sustancias químicas que se usan en la clarificación del jugo ha sido hecha con un completo conocimiento de la naturaleza química de los no-azúcares que uno desea eliminar pero esto no es así. La cal fue prácticamente el único agente purificador en uso mucho antes de emplearse los actuales.³

3.3. DESARROLLO DEL COLOR

Los colores de los constituyentes de la caña de azúcar, se derivan de pequeñas cantidades de pigmentos naturales tales como clorofilas, carotenoides y antocianinas, que se encuentran generalmente en la planta. En gran parte el color también resulta del material coloreado formado por degradación de los azúcares, por reacciones polifenol hierro, por reacciones entre los azúcares reductores y los aminoácidos, y por otras reacciones similares que tienen lugar durante el proceso de fabricación.

Dichos componentes coloreados se encuentran formando parte de muchas combinaciones, desde un punto de vista práctico estos constituyentes no pueden ser separados, debiéndose considerar que el color es una propiedad particular del azúcar.

En el proceso de elaboración de azúcar, al clarificar el jugo crudo de la caña, el calor y la cal incrementan el color debido a que descomponen los azúcares reductores. La presencia del hierro proveniente del equipo tiende también a incrementar el color obtenido debido a su reacción con los polifenoles. En las operaciones de evaporación y de cristalización puede desarrollarse color, debido a

² SPENCER – MEADE. Manual del Azúcar de Caña. Novena Edición. Montaner y Simón S.A. Barcelona 1967.

³ HONIG, Pieter. Principios de tecnología azucarera. Tomo 1. Editorial Continental S.A. 1969.

la caramelización y a los productos de la descomposición causada por el sobrecalentamiento. En las operaciones de refinación la solución se debe mantener con un pH lo más cercano a 7.0, evitándose a la vez las temperaturas excesivas.

3.3.1. Materiales coloreados provenientes de la caña

- Las sustancias de la caña que ya tenían color en su forma original.
- Las sustancias de la caña que son normalmente incoloras en su forma original pero que pueden desarrollar un color después de su extracción de la caña.
- Los compuestos coloreados que se forman durante el proceso por descomposición de algunos productos y por otras reacciones químicas.

3.3.1.1. No-Azúcares coloreados existentes originalmente en la caña

- a) Clorofilas: La clorofila es la cromo proteína que forma la materia colorante verde de las plantas.

Se conforma de dos pigmentos: La clorofila a y la clorofila b.

La clorofila a tiene la fórmula empírica $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$.

La clorofila b tiene la fórmula empírica $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$.

La clorofila forma una masa suave, insoluble en agua y en soluciones de azúcar pero solubles en alcohol, éter, álcalis y en otras sustancias; es de naturaleza coloidal.

En el jugo de caña la clorofila está presente en suspensión, lo que facilita la separación durante el proceso, asegurando su ausencia en las melazas. Aparentemente se forman compuestos incoloros con los iones férricos.

- b) Xantofila: Constituye el pigmento amarillo presente en las plantas. Su fórmula es $C_{40}H_{56}O_2$. Es insoluble en agua y en soluciones de azúcar, lo que no influye en el proceso de fabricación.
- c) Caroteno: Son pigmentos amarillos. Su fórmula es $C_{40}H_{56}$, tanto para α -caroteno como para β -caroteno. Son insolubles en agua y en solución de azúcar, por lo tanto no influye en el jugo de caña.
- d) Antocianina: Término general para sustancias rojas, azules y violetas que se encuentran en las plantas. Son solubles en agua, perteneciendo al grupo de compuestos orgánicos clasificados como glucósidos. Con Ácido Clorhídrico

concentrado toman color rojo, y con Hidróxido de Sodio al 10% se vuelven de color violeta rojizo.

La antocianina está ausente en variedades de caña blanca o amarilla, pero es muy evidente en las de color oscuro.

Al molerse la caña, las antocianinas entran en el jugo y al añadirse cal este toma un color verde oscuro, pero no se precipita, excepto en solución fuertemente alcalina.

Esta sustancia pertenece al grupo de los polifenoles que se oscurecen al combinarse con las sales de hierro.

La sulfitación separa parcialmente la antocianina y su cantidad varia dependiendo del tipo de caña.

3.3.1.2. No – Azúcares de la caña que pueden desarrollar un color

Existen gran cantidad de no-azúcares incoloros en la caña de azúcar que al combinarse o reaccionar con otras sustancias pueden formar materias colorantes. Se pueden clasificar en:

- a) Polifenoles: los polifenoles de la caña de azúcar reaccionan con el hierro y el oxígeno para dar compuestos de color oscuro, especialmente en soluciones alcalinas. Entre ellos están incluidos el tanino, derivado del ácido protocaténico, los hidroxilos fenólicos de la antocianina en la corteza, y de la “sacaretina” en la fibra de la caña. Además, las huminas y melanoidinas de la caña también contienen hidroxilos fenólicos. Todos estos polifenoles se oscurecen en contacto con el aire y en soluciones alcalinas, y forman compuestos de color muy oscuro con los iones férricos.

La sacaretina, se encuentra en la fibra, y en soluciones alcalinas toma un color amarillo y en soluciones neutras o ácidas es incolora. En las yemas y puntas de la caña reaccionan con el hierro y producen sustancias oscuras. Aunque el tanino, puede reaccionar más fácilmente, debido a su solubilidad en agua.

- b) Aminocompuestos: El nitrógeno en el jugo de la caña está representado por pocas centésimas del total que posee la caña de azúcar (1%). La mitad está representada en Amoniaco, aminoácidos y amidas. Estos compuestos incluyen asparraguina y glutamina, con sus correspondientes ácidos aspártico y glutámico. Otros compuestos menos significantes son tirosina, lisina, guanina, xantina y 5-metil-citosina.

La glicina, alanina, valina y leucina reaccionan con pequeñas cantidades de azúcares reductores formando compuestos coloreados.

3.3.1.3. No-azúcares coloreados obtenidos de los productos de descomposición del azúcar.

- a) Caramelo: Cuando el azúcar es calentado a más o menos 200 °C se forma un material de color oscuro llamado caramelo, debido a reacciones de deshidratación y condensación. El caramelo se puede formar tanto de la sacarosa como de la glucosa y de la fructosa y la composición depende de las condiciones de tiempo, temperatura y pH.
- b) Productos de la descomposición del azúcar: Cuando el azúcar de una solución queda sujeto a altas temperaturas y a condiciones ácidas se hidroliza formando los azúcares reductores D-glucosa y D-fructosa. Estas hexosas se descomponen por calentamiento prolongado y bajo condiciones fuertemente alcalinas. Los productos resultantes, de color café, muchas veces son ácidos, lo que causa una posterior inversión de la sacarosa.
- c) Productos de Reacción entre Azúcares Reductores y Aminocompuestos: Se debe a una reacción entre las hexosas y los relativamente débiles aminoácidos o aminoácidos complejos, donde influyen temperatura, humedad, pH y tiempo.

Basándonos en lo anterior tenemos en cuenta:

- 1) Las clorofilas, xantofilas y el caroteno son insolubles en agua su importancia es pequeña, ya que se eliminan, junto con otras impurezas insolubles, en el proceso de clarificación.
- 2) Las antocianinas tienen importancia debido a su color oscuro y a que reaccionan con el hierro para dar compuestos coloreados.
- 3) Las melanoidinas pueden llegar a tener importancia cuando exista la suficiente cantidad de nitrógeno para permitir la reacción entre los aminocompuestos y los azúcares reductores, aunque por otra parte pueden ser eliminadas en una variable proporción durante el procesamiento del jugo.

3.4. EFECTO DEL PH EN EL COLOR

Es un hecho que el color del azúcar depende en gran parte del pH de la solución. Esto se debe al diferente color que tienen algunas sustancias a diversas acideces y alcalinidades, siendo la materia colorante, en este caso, un indicador natural del pH. En general el color es más claro en las soluciones ácidas que en las alcalinas; esto fue observado en diversas investigaciones y procesos de decoloración.

3.5. CAMBIOS DE COLOR EN LA PRÁCTICA

3.5.1. Oscurecimiento del jugo de la caña

- Los estabilizadores del pH tienen un importante efecto sobre los cambios de color.
- Las sustancias húmicas café rojizas pueden quedar ocluidas en los cristales de azúcar, particularmente a valores bajos de pH.

3.5.2. Color en el azúcar crudo

Casi todo el azúcar crudo como los productos intermedios del azúcar están coloreados, ya sea de amarillo, ámbar o café rojizo oscuro. La cantidad y naturaleza de estos colores dependen del tipo de la materia colorante original y de las reacciones que ocurren durante el proceso. Los diversos factores que intervienen se originan en los crudos, las condiciones de la operación (pH, temperatura, etc.), los adsorbentes que se usan en el proceso, y en otras variables semejantes.

3.5.3. Desarrollo del color en el procesamiento del azúcar crudo de caña

Cierto número de los mismos factores que están involucrados en el oscurecimiento del jugo de la caña y del azúcar crudo. Se aplican en las operaciones de refinación. En este proceso se lava el azúcar crudo y se funde, esto es denominado licor afinado, se alcaliza, filtra y decolora; el último proceso es la cristalización y en esta etapa puede formarse color durante la concentración por ebullición. Parte de este color puede estar contenido en la película líquida que rodea el cristal, ya que, el cristal de sacarosa puede absorber ciertas impurezas coloridas tales como el caramelo coloidal y la melanoidina.

En soluciones ácidas de pH 5 el cristal adsorbe más materia colorante que en soluciones alcalinas de pH 9.

Sin perder de vista que uno de los principales objetivos del proceso de refinación es la eliminación del color, se puede decir que la eliminación completa de este no es siempre práctica. Por otra parte, como durante el proceso hay una formación de color, las condiciones deben ser cuidadosamente controladas para evitar un desarrollo excesivo del color.

El licor almacenado presenta un aumento de color hasta de un 200% a medida que disminuye la temperatura.

3.5.4. Desarrollo del color en el azúcar blanco

El desarrollo del color en el azúcar blanco es muy lento cuando se almacena en un lugar fresco, ya que la presencia de no-azúcares coloreados es muy pequeña. Según estudios en un azúcar almacenado durante aproximadamente 160 horas a 55 °C – 68 °C, el incremento del color es del 14% aproximadamente.

3.6. SEPARACIÓN DEL COLOR DE LOS PRECIPITADOS Y ADSORBENTES

Los no-azúcares coloreados que están presentes en el jugo de caña pueden separarse por medio de varios procesos físicos y químicos, los más empleados son:

- Cal y Ácido Fosfórico: agentes precipitantes en clarificación.
- Carbón de huesos o carbón activado: purificación.
- Dióxido de Azufre: decolorante.

En ciertos casos la separación de color se lleva a cabo por medio de la formación de compuestos insolubles que acarrean con ellos el color, directamente o en forma coloidal.

Se debe resaltar que aunque se usen dichos agentes precipitantes o adsorbentes, existe el peligro de que se forme más color si los agentes no se usan bajo las condiciones apropiadas, por lo tanto, es esencial mantener hasta donde sea posible, las condiciones en las que no se formen ni se destruyan los azúcares reductores.¹

3.7. MÉTODO MÁS EMPLEADO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN PRODUCTOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Enfocándonos principalmente en el proceso de eliminación de color mediante el empleo de dióxido de azufre tendremos en cuenta aspectos desde su producción hasta el efecto directo en el producto extraído de la caña de azúcar.

3.7.1. Proceso de sulfitación

El proceso de sulfitación ha sido empleado durante muchos años para la producción de azúcares blancos de consumo directo.

El uso del SO₂ unido al de la cal en la fabricación de azúcar crudo no es procedimiento general en la actualidad. En estados de Norteamérica y Sudáfrica

se empleaba el método de la sulfitación desde los años 20 aproximadamente, aunque el costo adicional de la sulfitación, el aumento de incrustaciones en calentadores y evaporadores; y el mayor contenido de ceniza en los azúcares crudos que se logran por este proceso son los motivos por los cuales se ha interrumpido la sulfitación en la producción de crudos.⁴

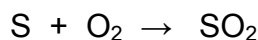
3.7.2. Azufre

Es uno de los agentes químicos más importantes de la industria azucarera. Se emplean los grados conocidos como azufre en piedra y azufre en rodillos.

Cuando el azufre se quema en un quemador tipo cerrado, la presencia de impurezas (sustancias bituminosas) puede interferir con la combustión debido a la formación de la película en la superficie estacionaria del azufre fundido, la que previene el acceso del aire necesario para el proceso de combustión.

3.7.3. Gas del quemador de azufre. Dióxido de Azufre

El proceso de combustión: El azufre calentado en el aire a 250 °C se inflama y se quema con una llama de color azul purpura, formando dióxido de azufre y produciendo 2217 Kcal/Kg de azufre.



El calor desprendido es más que suficiente para fundir todo el azúfre presente en el aparato utilizado para producir dióxido de azufre y para calentar el azufre fundido hasta una temperatura final que depende de la velocidad de combustión y del efecto sobre el dispositivo externo de enfriamiento que usualmente se tiene.

El azufre fundido se evapora (la presión de vapor depende de la temperatura del líquido) y los vapores calientes de azufre se queman al entrar en contacto con el aire. La combustión será completa si se hace llegar el suficiente oxígeno por un periodo de tiempo suficientemente grande a una alta temperatura suficiente.

3.7.4. Hornos de quemadores de azufre

En la industria azucarera se utilizan dos tipos de quemadores: el tipo cerrado y el tipo abierto.

El horno empleado en el Ingenio Risaralda S.A es un horno rotatorio compuesto de un cilindro horizontal, de acero, con extremos en forma de cono, de hierro colado, diseñado de tal modo que se le puede impartir un lento movimiento de rotación alrededor de su eje horizontal. El azufre se alimenta manualmente a la tolva

⁴ SPENCER – MEADE. Manual del Azúcar de Caña. Novena Edición. Montaner y Simón S.A. Barcelona 1967.

dosificadora que se mueve a una velocidad constante, regulando el paso hacia el horno rotatorio, fundiéndose al caer, por lo que gotea al interior del aparato. El aire necesario para esta combustión entra por el extremo anterior del aparato.

Como el azufre fundido está en constante movimiento, no deja que se forme la película de sustancias bituminosas, permite así que se pueda quemar una calidad de azufre mayor que en otro tipo de quemador.

Los gases de SO_2 ascienden por la tubería que consta de una camisa de enfriamiento por la cual circula agua para disminuir la temperatura de los gases.

La adición de azufre se realiza sin interrupción del proceso de combustión.

En cualquier tipo de quemador de azufre, el aire que se suministre al horno debe estar seco, ya que la humedad del aire permitirá la formación de Ácido Sulfúrico, cuyo efecto es claramente perjudicial para las tuberías, accesorios, etc.; y es especialmente grave si llega al guarapo.⁵

Figura 3. Horno quemador de azufre del Ingenio Risaralda S.A.



⁵ HONIG, Pieter. Principios de tecnología azucarera. Tomo 1. Editorial Continental S.A. 1969.

3.7.5. Torre de sulfitación

Los aparatos de sulfitación pueden tener muchas formas dependiendo si esta se hace por tandas, continua y de acuerdo con la temperatura.

Este proceso consiste en: el jugo mezclado frío penetra en forma de ducha en tanques altos, verticales y cilíndricos, de 1.20 m ó más de diámetro y de 4.5 m de alto, cuyas dos terceras partes superiores están dotadas de una serie de parrillas de madera dura contruidos en tablas de 2x4 pies, puestas de canto. El jugo entra por la parte superior de la torre, en forma de ducha, y atraviesa el emparrillado de madera, en el cual encuentra la corriente gaseosa ascendente de Dióxido de Azufre (SO_2). Estas torres funcionan en contracorriente al vacío; el cual puede ser generado por medio de un eyector o un eductor (entendiendo que funcionan con el mismo principio), los cuales trabajan como un sistema venturi generando vacío por el cambio de velocidades debido a las restricciones en la tubería.

El flujo de azufre aproximado de 1500 - 3000 Lb/hr se controla por medio de la medición de la acidez (pH) de la mezcla resultante

El guarapo sulfitado se extrae del fondo cónico de la torre, a un pH de 3.8 - 4.0; se alcaliniza en un tanque aparte de alcalinización a pH 6.5 - 6.8, para neutralizar la acidez e iniciar los procesos de floculación que permiten la separación de los sólidos no azúcares que han entrado con la caña, y entonces se calienta a ebullición y se decanta. Aunque en este proceso la sulfitación del jugo es continua, la alcalinización subsiguiente se suele hacer en tandas o etapas Este jugo alcalizado tiene un pH de 7.2 – 7.5.

Figura 4. Torre de sulfitación del Ingenio Risaralda S.A.



Figura 5. Vista completa del horno quemador de azufre y la torre de sulfitación del Ingenio Risaralda S.A.



3.7.6. Dióxido de Azufre (SO_2)

3.7.6.1. Descripción

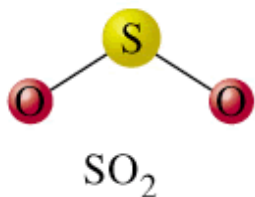
El dióxido de azufre es el óxido más común y uno de los más importantes. Es un gas incoloro, denso, de olor intenso e irritante en concentraciones superiores a 3 ppm, tóxico (máximo tolerado por los humanos 5 ppm y para los vegetales 1 ppm).⁶

Es 2.2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera, siendo un gas bastante estable.

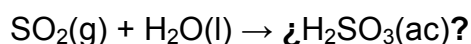
⁶ <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/azufre/oxidos-azufre>

3.7.6.2. Estructura molecular

Angular (119°), híbridos sp^2 . El enlace S–O está reforzado por la posibilidad de retrodonación dp-pp. La distancia S–O (1.431\AA) es intermedia entre la de un enlace sencillo y uno doble.



Es un compuesto muy soluble en agua (39 cc de gas en 1 cc de agua), aunque no se ha detectado la formación del *ácido sulfuroso* aunque sí existen sus correspondientes sales (sulfitos y bisulfitos).

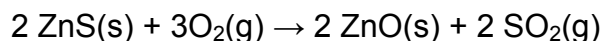
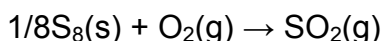


Tiene propiedades reductoras lo que justifica su capacidad para actuar como agente blanqueador.

Medio ácido: $E^\circ(\text{SO}_4^{2-}/\text{SO}_2) = 0.2\text{V}$.

Medio básico: $E^\circ(\text{SO}_4^{2-}/\text{SO}_3^{2-}) = -0.90\text{V}$ (más reductor en medio básico)

A escala industrial se obtiene mediante dos métodos, la combustión directa de azufre o sulfuro de hidrógeno y la tostación de sulfuros de metales.

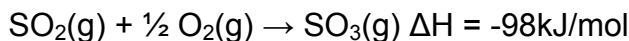


A pequeña escala puede obtenerse haciendo reaccionar ácido sulfúrico con sulfito sódico:



3.7.6.3. Principales usos

La principal aplicación del SO_2 es la síntesis de SO_3 para obtener ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfitos, sulfatos y dióxido de azufre.



En medicina, el azufre ha cobrado gran relevancia por la extensión del uso de las sulfamidas y su utilización en numerosas pomadas tópicas. Se emplea también para fabricar fósforos, caucho vulcanizado, tintes y pólvora. En forma de polvo finamente dividido y frecuentemente mezclado con cal, el azufre se usa como fungicida para las plantas. La sal tiosulfato de sodio, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, llamada impropriamente hiposulfito, se emplea en fotografía para el fijado de negativos y positivos. Combinado con diversas láminas de minerales inertes, el azufre constituye un pegamento especial utilizado para sujetar objetos metálicos a la roca, como en el caso de los rieles o vías de tren y cadenas. El ácido sulfúrico es uno de los productos químicos industriales más importantes, pues además de emplearse en la fabricación de productos que contienen azufre sirve también para elaborar una gran cantidad de materiales que no contienen azufre en sí mismos como el ácido fosfórico.⁷

El SO_2 también se emplea en la industria del papel y la pulpa de madera como blanqueador. Otro de sus usos más destacados es como aditivo en vinos. El SO_2 se usa como antioxidante y para prevenir el oscurecimiento en vinos, patatas deshidratadas y otros.

El SO_2 parece ser inocuo cuando se ingiere con los alimentos, sin embargo es muy irritante para las vías respiratorias cuando se inhala. Su utilización en la fabricación de vinos tiene los siguientes efectos: evitar el crecimiento de levaduras, que se encuentran en la piel de las uvas y que estropearían el vino, se combina con el acetaldehído, una sustancia que puede afectar al sabor del vino y, por último, sirve como antioxidante para prevenir la oxidación del alcohol etílico a ácido acético (vinagre).⁸

3.7.6.4. El problema medioambiental de los óxidos de azufre

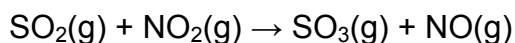
El dióxido de azufre, SO_2 , es un contaminante primario que se produce en la combustión de compuestos que contienen azufre. Los óxidos de azufre se eliminan del aire mediante su conversión en ácido sulfúrico y sulfatos. En esta forma terminan depositándose sobre la tierra o en el mar debido a la precipitación pluvial o sedimentándose en forma de macropartículas. Como sucede con los óxidos de nitrógeno el vaciadero final de los óxidos de azufre lo constituyen la tierra o el mar. El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el anhídrido sulfuroso (SO_2), y en menor proporción, que no rebasa el 1 ó el 2 por ciento del anterior, el anhídrido sulfúrico (SO_3).

⁷ <http://www.prodigyweb.net.mx/degcorp/Quimica/Azufre.htm>

⁸ <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/azufre/oxidos-azufre>

El SO_3 es un gas incoloro y muy reactivo que condensa fácilmente; En condiciones normales, no se encuentra en la atmósfera, ya que reacciona rápidamente con el agua, formando ácido sulfúrico. La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre produce emisiones de SO_2 y SO_3 ; la cantidad de SO_3 producida depende de las condiciones de la reacción, especialmente de la temperatura, oscilando entre 1 y 10 por ciento de los SO_x producidos.³

La contaminación industrial consiste principalmente en partículas (cenizas y humo), $\text{SO}_2(\text{g})$ y niebla de H_2SO_4 . Muchas operaciones industriales producen cantidades importantes de $\text{SO}_2(\text{g})$. Sin embargo, los principales responsables de los escapes de $\text{SO}_2(\text{g})$ son las plantas térmicas de carbón y los combustibles de alto contenido de azufre. El $\text{SO}_2(\text{g})$, como hemos visto, puede oxidarse a $\text{SO}_3(\text{g})$, especialmente cuando la reacción se cataliza sobre las superficies de las partículas en suspensión en el aire o mediante la reacción con $\text{NO}_2(\text{g})$:



A su vez el $\text{SO}_3(\text{g})$ puede reaccionar con vapor de agua de la atmósfera obteniéndose niebla de H_2SO_4 , un componente de la lluvia ácida (el pH de la lluvia ácida es de 4,3 mientras que el pH de la lluvia normal es de 5,5). La lluvia ácida tiene una incidencia relevante en las aguas superficiales, especialmente en los lagos puesto que puede llegar a alterar su pH. También afecta considerablemente a los bosques. Ataca a los edificios construidos con piedra caliza debido a que el H_2SO_4 reacciona con el CaCO_3 componente de aquellas y de los mármoles:



Por otra parte, la reacción de H_2SO_4 con el NH_3 del aire produce partículas de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Los detalles del efecto en el organismo humano de concentraciones bajas de SO_2 y H_2SO_4 no se conocen del todo, pero está claro que estas sustancias irritan el sistema respiratorio. Niveles superiores a 0.10 ppm se consideran nocivos potencialmente.

Por todo ello, la minimización de la generación de óxidos de azufre es un problema medioambiental serio. Las medidas para reducir las emisiones de $\text{SO}_2(\text{g})$ y $\text{NO}(\text{g})$ incluyen la utilización de combustibles de bajo contenido de azufre, el control de las temperaturas de combustión para reducir las emisiones de $\text{NO}(\text{g})$ e impedir la emisión de gases de escape no permitidos, por diferentes medios.

▪ Indicador de contaminación

Es necesario medir la exposición de las personas a la concentración de Óxidos de Azufre y reducir las emisiones al mínimo. Los agentes contaminantes producen diversos daños a la salud. Esto se ha probado mediante correlaciones estadísticas entre los niveles de exposición y los casos de morbilidad. Este indicador

permite hacer seguimiento al grado de exposición de contaminantes atmosféricos al que está sometida la población urbana. La población colombiana tiende a concentrarse cada vez más en ciudades, lo que implica mayor exposición y vulnerabilidad a los contaminantes atmosféricos. El incremento en la calidad del aire es una meta fuerte de las políticas de Calidad de Vida. El estudio de los efectos es igualmente importante ya que se han comprobado sinergismos entre diferentes sustancias contaminantes que pueden magnificar su impacto sobre la salud en forma progresiva, tanto como en la productividad, como en la economía.³ Algunas consecuencias de las emisiones de dióxidos de azufre son:

La lluvia ácida, una seria amenaza en todo el mundo, se produce cuando las emisiones de dióxido de sulfuro y óxido de nitrógeno procedentes de la combustión de automóviles y centrales térmicas que emplean combustibles fósiles vuelven a caer sobre la tierra en forma de precipitación ácida. La lluvia ácida ha provocado la contaminación de numerosos lagos, los árboles han perdido sus hojas de forma moderada o grave debido a los residuos corrosivos y en muchas partes del mundo la producción de alimentos ha disminuido. La lluvia ácida también causa la erosión de importantes monumentos y tesoros arquitectónicos.

El calentamiento global de la atmósfera es otro efecto nocivo de la contaminación atmosférica

Aunque la emisión de gases que provoca **el efecto invernadero** ha descendido un 11% en los últimos años, esto podría tratarse sólo de una pausa temporal debido a la recesión mundial y la desaceleración industrial. En efecto, sería necesaria una reducción del 60% de las emisiones para estabilizar los gases atmosféricos en sus niveles actuales.

La contaminación atmosférica urbana, producida por la industria y los automóviles, sigue siendo un grave peligro para la salud de más de mil millones de personas en todo el mundo. Durante los años ochenta, los países europeos redujeron las emisiones de dióxido de sulfuro en más del 20% y el volumen de la mayoría de los contaminantes descendió en los Estados Unidos. No obstante, en uno de cada tres días en Los Ángeles, Nueva York, Ciudad de México y Pekín se registran niveles insalubres de polución atmosférica.

En las ciudades, **el polvo atmosférico** contiene también un gran número de partículas de humo y de hollín. En una ciudad industrial, la concentración de partículas en el aire puede superar los tres millones por centímetro cúbico, mientras que en medio de un océano o en montañas altas puede ser de unos pocos centenares de miles por centímetro cúbico.

Las partículas de polvo tienen un tamaño que varía desde media micra hasta muchas veces ese tamaño. Se mantienen suspendidas en el aire durante largos periodos y pueden ser transportadas a grandes distancias.

El polvo atmosférico tiene dos propiedades físicas importantes: dispersa la luz de longitudes de onda cortas, afectando por tanto al color del cielo, y sirve de núcleo en la condensación de vapor de agua. Sin la presión de las partículas de polvo no se formarían las neblinas, las nieblas, el smog, ni las nubes.

Los polvos se clasifican según su origen en naturales o industriales.

Según el origen y en función de su determinación, los polvos industriales se clasifican en los siguientes grupos:

- 1) Orgánicos: vegetales (polvos de madera y algodón, entre otros)
 - animales (polvos de huesos y piel, entre otros)
 - sintéticos (polvos de plásticos y materiales artificiales, entre otros).
- 2) Inorgánicos: minerales (polvos de cuarzo y silicatos, entre otros)
 - metálicos (polvos de oxido, hierro y aluminio, entre otros)
 - no metálicos (polvos de azufre y otros)
- 3) Mixtos (polvos de pulido de metales y de limpieza de piezas de fundición, entre otros)

Las bases (compuestos químicos con un pH mayor que 7) existentes en el polvo atmosférico tienen un efecto beneficioso al contrarrestar la acidez de las deposiciones ácidas. Su reducción por múltiples factores parece incrementar los efectos dañinos sobre el medio ambiente provocados por la lluvia ácida.

3.7.7. Tipos de sulfitación

Los procesos de sulfitación pueden tener modificaciones como:

- a) Modificar la secuencia en la cual se aplica la cal y el SO_2 : alcalinizar primero, sulfitar primero, aplicar la cal y el gas simultáneamente, procedimientos fraccionados.
- b) Modificaciones de la temperatura: Sulfitar en caliente o en frío, calentar escalonadamente.
- c) Aplicación de los reactivos: en etapas o tandas, de manera continua, con control manual o automático.

Estas variables permiten muchas combinaciones, las más usadas son:

3.7.7.1. Sulfitación en frío

Consiste en bombear el guarapo crudo frío a través de una torre o caja de sulfitación, en contracorriente con el SO_2 , para que absorba todo el gas que sea posible (Acidez 3.0 a 4.0 ml, de álcali 0.1 N por 10 ml de jugo, pH 4.0 o inferior). La alcalinización hasta acidez débil (pH aproximado 6.5) es seguida por la calefacción, sedimentación y decantación, igual que en el proceso de defecación. Después se evapora hasta formar un jarabe ligero, que se deja decantar de 6 a 24 horas antes de cocer. A la primera templea, que rinde un azúcar casi blanco que se lava bien en la centrifuga, sigue frecuentemente una segunda que rinde azúcar crudo de calidad inferior.

3.7.7.2. Sulfitación después de alcalinizar

Al jugo se le adiciona una cantidad considerable de lechada de cal. Entonces se hace la sulfitación hasta un pH de aproximadamente 7.5, produciéndose un precipitado denso que puede ser eliminado por sedimentación y decantación. Después de la evaporación, el jarabe se enfría y sulfita a punto ligeramente ácido (pH 6.5).

3.7.7.3. Sulfitación en caliente

El propósito de esta técnica es el de disminuir la solubilidad del sulfito de calcio, que es más soluble a baja temperatura y alcanza su solubilidad mínima a unos 75 °C. El jugo se calienta primero a esta temperatura, después se sulfita y alcaliniza (pH Aproximado 7.2), se hierve y se deja sedimentar.

3.7.7.4. La sulfitación continua

El jugo y el gas pasan continua y simultáneamente en contracorriente a través de una torre, después se alcaliniza el jugo ácido según un procedimiento por tandas o etapas.

3.7.7.5. Procedimientos fraccionados

Consiste en aplicar la cal en dos etapas: se pre alcaliniza el guarapo a pH 11.0 durante un corto tiempo, y después mantienen el pH entre 7.5 y 8.0, alcalinizando y sulfitando simultáneamente.

3.7.7.6. La sulfitación del jarabe

Se emplea jarabe que sale de los evaporadores, y se obtiene un azúcar de calidad mejor y más uniforme que la que se obtiene por sulfitación del guarapo solo. El jarabe sulfitado se suele mantener a pH definitivamente ácido (pH 6.1 a 6.5).

3.7.8. Aspectos positivos de la sulfitación

Es múltiple el efecto del dióxido de azufre en la fabricación de azúcar, pudiendo esto representarse brevemente de la siguiente manera:

- En la acidificación de los jugos mezclados, en que se agrega dióxido de azufre hasta un pH menor de 6.0, reaccionando este compuesto con el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 para formar el complejo insoluble $\text{R}_2\text{O}_3 (\text{SiO}_2)_n$. Esta misma reacción ocurre en la sulfitación de meladuras y melazas.
- El dióxido de azufre se combina con el CaO en el proceso de sulfitación produciendo CaSO_3 en forma de gruesos cristales que funcionan como auxiliares de la operación de filtración.
- En la sulfitación de meladura y melazas el dióxido de azufre reacciona con los organatos de calcio formando CaSO_3 insoluble y ácidos orgánicos libres.
- En los jugos el dióxido de azufre retarda la reacción entre los azúcares reductores y, en particular, inhibe la formación de compuestos de oxidación de color oscuro, productos de la condensación de aminoácidos y azúcares reductores.
- Está demostrado que los sulfitos no se oxidan rápidamente a sulfatos si las soluciones de azúcar están en contacto con el aire. El exceso de dióxido de azufre presente en las soluciones ácidas (pH menor de 6.0) se separa parcialmente por evaporación.
- El exceso de dióxido de azufre libre que existe en las soluciones de azúcar se separa parcialmente en los tachos por efecto del vacío.
- Es evidente que la intensiva sulfitación de meladuras y melazas tiene un efecto muy especial, aunque el análisis de los líquidos que están en proceso de cristalización muestre que una gran parte del SO_2 no está ya presente por haberse eliminado por evaporación durante la operación de concentración.
- La cantidad de sulfitos que, de hecho, se transforma en sulfato (desde la meladura hasta las mieles finales y el azúcar elaborado), comprende no más del 10% del azufre que como SO_2 se añade a la meladura.
- Según estudios realizados se indica que el efecto blanqueador es probablemente el resultado de la combinación con los azúcares reductores, obteniéndose así un bloqueo de la función carbonilo, que es esencial para la formación de caramelo y melanoidina.
- Si el jugo se alcaliza antes de la sulfitación se forma un precipitado pesado que absorbe una gran cantidad de sustancias colorantes.

3.7.9. Aspectos negativos de la sulfitación

Al sulfitar meladuras y melazas debe hacerse una distinción entre las reacciones siguientes, causadas por un exceso de azufre como agente precipitante.

- A valores bajos de pH (pH 6.0) el dióxido de silicio reacciona con los sesquióxidos para formar compuestos insolubles ligeramente hidratados, los que disminuyen la viscosidad que poseen las soluciones de azúcar,
- El dióxido de azufre reacciona con los organatos de calcio produciendo un precipitado de CaSO_3 y ácidos orgánicos libres, disminuyendo también la viscosidad de las soluciones.
- En la práctica se ha encontrado que si las meladuras blanqueadas se exponen al aire durante algún tiempo, entonces se oscurecen otra vez debido a la oxidación.
- La temperatura y la alcalinización son muy importantes desde el punto de vista del color final que se trata de obtener. Las temperaturas arriba de 70 °C son altamente perjudiciales para aclaración del color, así como también las alcalinizaciones arriba de un pH de 8.5. Se ha dicho que los mejores azúcares sulfitados se obtienen evitando una sobre alcalización localizada (no sobre un pH de 8) y una alta temperatura (no sobre 70 °C).

3.8. MÉTODO PARA ELIMINACIÓN DE COLOR EN EVALUACIÓN

Como método alternativo para eliminación de color en meladura, se tiene el Peróxido de Hidrógeno. Dicho producto es muy utilizado como agente decolorante de fibras aunque en el proceso producción del azúcar no ha sido muy explorado.

3.8.1. Compuestos de oxígeno

Peróxido de hidrógeno: H_2O_2

Compuesto químico con características de un líquido altamente polar, fuertemente enlazado con el hidrógeno tal como el agua, que por lo general se presenta como un líquido ligeramente más viscoso que éste. Es conocido por ser un poderoso oxidante. Es un líquido incoloro a temperatura ambiente con sabor amargo.

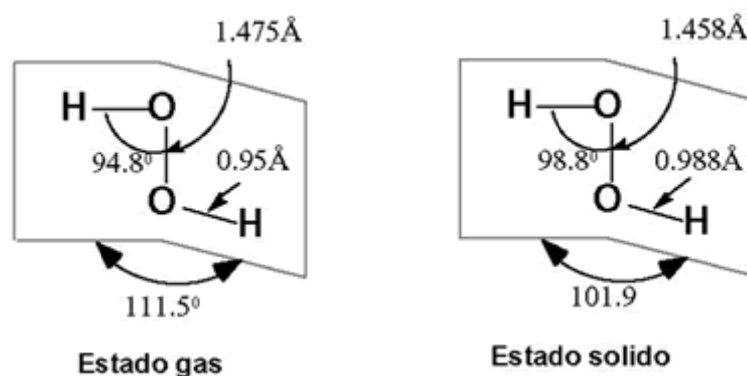
El peróxido de hidrogeno, también llamado agua oxigenada, es una sustancia líquida ($T_{\text{fus}} = -0.43^\circ$ y $T_{\text{eb}} = 150^\circ\text{C}$). Tiene un punto de ebullición más alto que agua, así que las disoluciones se pueden concentrar por evaporación. A temperatura ambiente, es un líquido azul pálido casi incoloro y viscoso (consecuencia del enlace por puentes de hidrógeno, $d = 1.44 \text{ g/cc}$). A

concentraciones elevadas es extremadamente corrosiva y por tanto en esas condiciones debe ser utilizada con gran precaución. Es una sustancia más ácida que el H_2O ($K_a = 1.5 \cdot 10^{-12}$).⁹

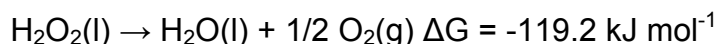
Pequeñas cantidades de peróxido de hidrógeno gaseoso ocurren naturalmente en el aire. El peróxido de hidrógeno es inestable y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor. Aunque no es inflamable, es un agente oxidante potente que puede causar combustión espontánea cuando entra en contacto con materia orgánica o algunos metales, como el cobre, la plata o el bronce.¹¹

La geometría molecular se presenta en los esquemas que siguen. Las moléculas tienen una estructura no plana (en forma de libro) cuyo momento dipolar es mayor que el del agua. El ángulo diédrico varía notablemente entre estado gaseoso o sólido.

Figura 6. Geometría molecular del Peróxido de Hidrogeno.



Es termodinámicamente inestable respecto a la descomposición: (ver diagrama de Frost)



Cuando está pura el proceso de descomposición es lento debido a factores cinéticos (el mecanismo de reacción supone una muy elevada energía de activación). Pero casi cualquier cosa (iones metálicos de transición, metales, sangre, polvo) es capaz de catalizar su descomposición. Incluso los pocos iones que una botella de vidrio libera en la disolución son capaces de iniciar dicha descomposición. Esta es la razón por la que se debe guardar en botellas de

⁹ <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/oxigeno/compuestos>

plástico. Un simple calentamiento también induce una rápida descomposición. Se suele añadir como estabilizador por ser un agente quelante como el AEDT.

El peróxido de hidrógeno es soluble en agua en todas proporciones. Usualmente se adquiere el agua oxigenada en solución acuosa al 30% o 120 volúmenes. (Esto indica que por la descomposición del H_2O_2 contenido en un litro de disolución se formarían 120 litros de oxígeno medido en condiciones estándar según la reacción de descomposición). Al igual que el agua, es un buen disolvente de compuestos iónicos pero presenta el inconveniente ya señalado que puede descomponerse fácilmente en su presencia.

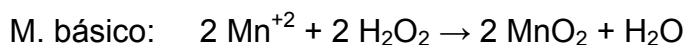
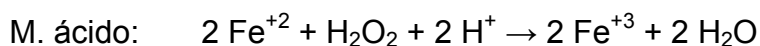
El peróxido de hidrogeno es un fuerte oxidante en medio ácido y, en menor medida en medio básico.

Tabla 3. Oxidación Peróxido de hidrogeno.

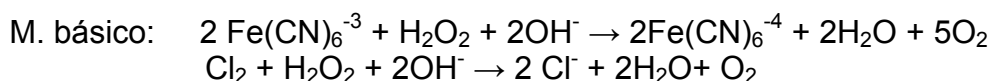
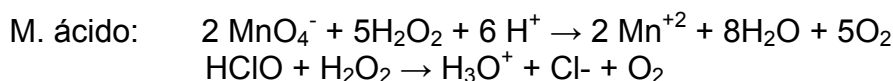
R-1	H_2O_2	$+ 2\text{H}^+$	$+ 2\text{e}^-$	$\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$E^\circ = 1,78 \text{ V}$
R-2	O_2	$+ 4\text{H}^+$	$+ 4\text{e}^-$	$\rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	$E^\circ = 1,23 \text{ V}$
R-3	O_2	$+ 2\text{H}^+$	$+ 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$E^\circ = 0,70 \text{ V}$
R-4	O_2	$+ 2\text{H}_2\text{O}$	$+ 4\text{e}^-$	$\rightarrow \text{H}_2\text{O}_2$	$E^\circ = 0,40 \text{ V}$
R-5	OH_2^-	$+ \text{H}_2\text{O}$	$+ 2\text{e}^-$	$\rightarrow 3\text{OH}^-$	$E^\circ = 0,88 \text{ V}$
R-6	O_2	$+ \text{H}_2\text{O}$	$+ 2\text{e}^-$	$\rightarrow \text{OH}_2^- + \text{OH}^-$	$E^\circ = -0,076 \text{ V}$

De la primera reacción (R-1) podemos inferir que el peróxido de hidrógeno puede actuar como un oxidante fuerte. Dado que el estado de oxidación en el peróxido es (-1), también puede oxidarse a O_2 y por tanto puede actuar también como reductor (R-3).

Como agente oxidante

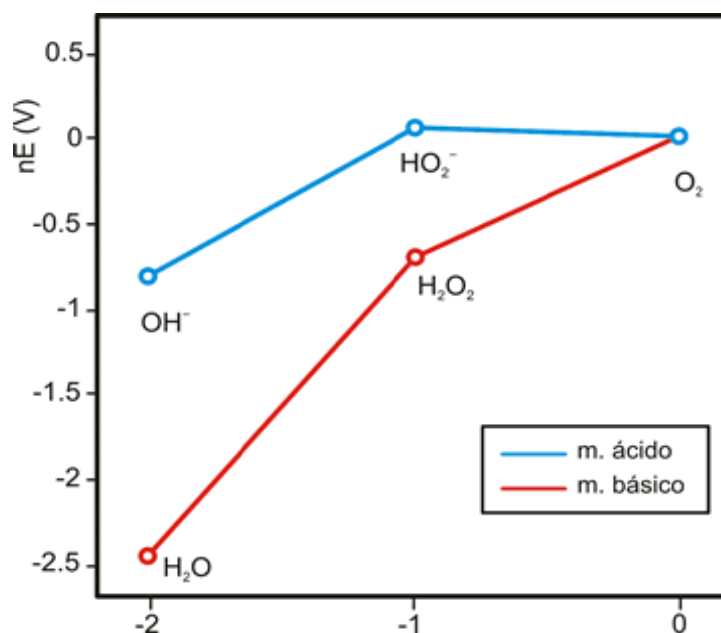


Como agente reductor

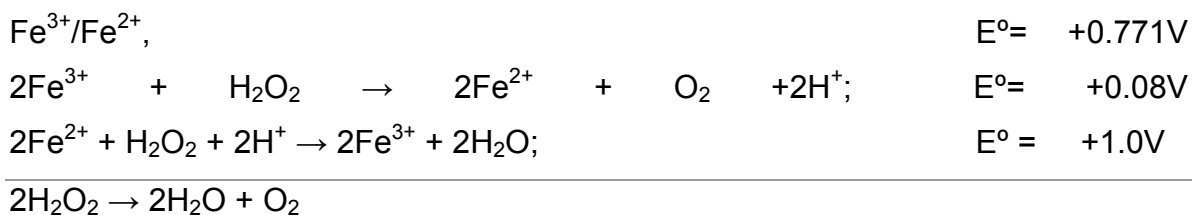


Termodinámicamente es mejor oxidante que reductor. Las reacciones de oxidación se suelen llevar a cabo en medio ácido mientras que las de reducción en medio básico. Se comporta como reductor frente a oxidantes fuertes como el MnO_4^- .

Figura 7. Diagrama de Frost.



El diagrama de Frost muestra que H_2O_2 es inestable frente a su dismutación, tanto en medio ácido como básico. En la práctica, a temperaturas moderadas, no se descompone a menos que haya presente trazas de metales que catalizan su descomposición. La mayoría de catalizadores de esta reacción son pares redox en los que la forma oxidada puede reducir al H_2O_2 mientras que la forma reducida puede reducir al H_2O_2 . Viendo el diagrama de Frost vemos que cualquier par con potencial $0.695 < E^\circ < 1.77 \text{ V}$ en medio ácido puede catalizar la reacción de descomposición del peróxido de hidrógeno.



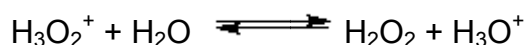
El peróxido de hidrógeno tiene una química rica y variada consecuencia de:

- 1) La capacidad para actuar tanto como agente oxidante como reductor en medio ácido y en medio básico. Se oxida con MnO_4^{2-} y Ce^{+4} dando O_2
- 2) La capacidad para actuar en reacciones ácido base dando sales de peroxonio (H_2OOH^+), hidroperóxidos (OOH^-), y peróxidos (O_2^{2-}). El peróxido de hidrógeno es un ácido más fuerte que el agua y en disoluciones diluidas tiene un pK_a (20 °C) de 11.75.



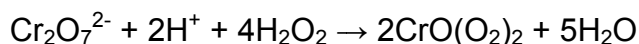
Ácido base

Del mismo modo, el H_2O_2 es una base más débil que el H_2O , estando el siguiente equilibrio desplazado hacia la derecha:



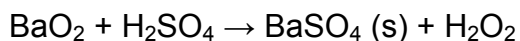
Esta propiedad del agua oxigenada de dar reacciones ácido base permite la obtención de sales de peroxonio (H_2OOH^+), hidroperóxidos (OOH^-), y peróxidos (O_2^{2-}). En el caso concreto de ion hidroperóxido, éste se obtiene por desprotonación del H_2O_2 . Los hidro peróxidos de los metales alcalinos, MOOH , se conocen en disolución. El NH_3 líquido también es capaz de desprotonar el H_2O_2 conduciendo a la formación del $\text{NH}_4^+\text{OOH}^-$, sólido de color blanco que presenta un punto de fusión de 25 °C.

- 3) (iii) La capacidad para formar complejos peroxometal y aniones peroxoácido.

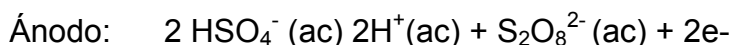
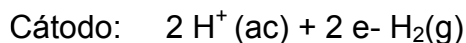


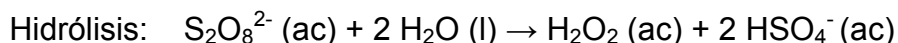
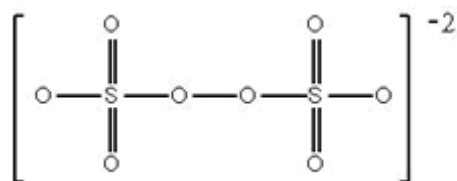
3.8.2. Obtención del peróxido de hidrógeno

Fue preparado por primera vez en 1.818 mediante la siguiente reacción química:

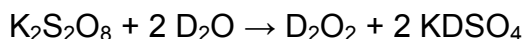


Posteriormente se preparó mediante hidrólisis de peroxidisulfatos, procedente de la electrolisis de bisulfatos:





Este proceso se utiliza en la actualidad tan sólo cuando se quiere preparar, a escala de laboratorio, el peróxido de deuterio D_2O_2 :



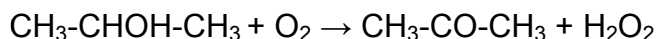
3.8.2.1. Preparación industrial

Existen tres procesos industriales para preparar H_2O_2 :

- 1) Oxidación del isopropanol.
- 2) Oxidación electroquímica del H_2SO_4 o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- 3) Proceso de la antraquinona (el más importante).

3.8.2.1.1. Método de la oxidación del isopropanol

Se utiliza al alcohol como producto de partida. El rendimiento es del 30 %.



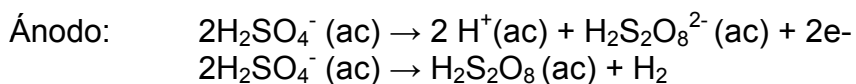
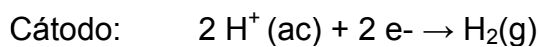
(90-140°C, 15-20 atm)

El rendimiento es tan bajo debido a reacciones colaterales. El peróxido de hidrógeno se separa por destilación fraccionada. Se obtiene así una disolución de H_2O_2 al 20 % en peso. La gran desventaja de este proceso es que se obtienen doble peso de acetona que de H_2O_2 .

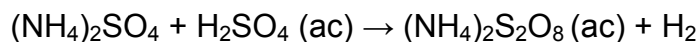
3.8.2.1.2. Método de la oxidación electroquímica del H_2SO_4 o $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

El peróxido de hidrógeno se maneja ordinariamente en forma de disolución al 3%. Esta disolución se obtiene por electrolisis del ácido sulfúrico concentrado (550 a 570 g/L) o de ácido sulfúrico (260 g/l), lo que origina el ácido peroxodisulfúrico $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$, hidrolizando después el ácido y destilando el peróxido de hidrógeno obtenido:

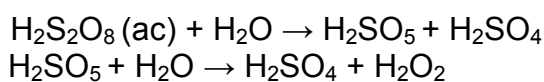
- Electrólisis:



- Con $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (210 a 220 g/l):



- Hidrólisis:



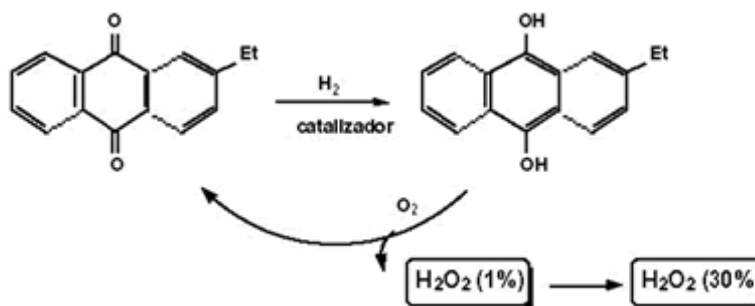
El rendimiento del proceso es del 70 %. La desventaja del proceso es el costo de la electricidad y de la producción.

3.8.2.1.3. Proceso de la antraquinona (el más importante)

Se obtiene por reducción de alquilantraquinona. La posterior oxidación con aire del 2-alquilantrahidroquinona formado regenera la etilantraquinona con formación de peróxido de hidrógeno, que se extrae con agua. Esta debe estar perfectamente desionizada y contener un estabilizador de H_2O_2 (pirofosfato o estannato de sodio). Las disoluciones de H_2O_2 se concentran en vacío, obteniéndose concentraciones que varían entre el 15 % y el 35% en peso.

La hidroantranquinona requiere de disolventes aromáticos mientras que la antraquinona requiere disolventes polares tipo alcohol o ésteres. Ello conlleva el uso de mezclas complejas de disolventes, que suelen ser costoso, de manera que hay que recuperarlos. La naturaleza del radical R depende del fabricante. Se emplean $\text{R} = \text{Et}$, *tert*-Bu, etc.

Figura 8. Obtención de Peróxido de Hidrogeno empleando antraquinona.



El catalizador de la fase de hidrogenación es de paladio. La reacción se efectúa a 40 °C y a presiones de 5 bar. El rendimiento de la reacción es del 98 %. La producción mundial es de alrededor de 10^6 tn/año.

3.8.3. Toxicidad

El peróxido de hidrógeno no es tóxico, ya que solo contiene hidrógeno y oxígeno, dos elementos encontrados en el cuerpo humano y de hecho el cuerpo humano produce peróxido de hidrógeno. El peróxido de hidrógeno es muy irritante en concentraciones altas, ya que causa quemaduras temporales al desprenderse en la reacción el oxígeno.

El peróxido de hidrógeno en concentraciones menores al 3% es usado en todo el mundo para curar varias enfermedades, como algunos tipos de cáncer y esclerosis múltiple entre otras y su uso es cada día más conocido.

El peróxido de hidrógeno de uso domestico al 3% no puede ser usado para ingerir o para ningún tratamiento de oxigenoterapia ya que contiene gran cantidad de estabilizantes y metales que son muy dañinos al cuerpo humano, el peróxido para terapias tiene que ser peróxido puro, sin ningún tipo de metal ni estabilizadores y su concentración es menor al 3%.

Inhalar el producto para uso doméstico (3%) puede producir irritación de las vías respiratorias, mientras que el contacto con los ojos puede producir leve irritación de los ojos. Inhalar vapores de las soluciones concentradas (más del 10%) puede producir grave irritación pulmonar.

La ingestión de soluciones diluidas de peróxido de hidrógeno puede inducir vómitos, leve irritación gastrointestinal, distensión gástrica, y en raras ocasiones, erosiones o embolismo (bloqueo de los vasos sanguíneos por burbujas de aire) gastrointestinal. Ingerir soluciones de 10-20% de concentración produce síntomas similares, sin embargo, los tejidos expuestos pueden también sufrir quemaduras. Ingerir soluciones aun más concentradas, además de lo mencionado anteriormente, puede también producir rápida pérdida del conocimiento seguido de parálisis respiratoria.

El contacto de una solución del 3% de peróxido de hidrógeno con los ojos puede causar dolor e irritación, sin embargo las lesiones graves son raras. La exposición a soluciones más concentradas puede producir ulceración o perforación de la córnea. El contacto con la piel puede producir irritación y descoloramiento pasajero de la piel y el cabello. El contacto con soluciones concentradas puede causar graves quemaduras de la piel y ampollas.

Se desconoce si la exposición al peróxido de hidrógeno puede afectar la reproducción en seres humanos.

3.8.4. Aplicaciones del Peróxido de Hidrogeno (H_2O_2)

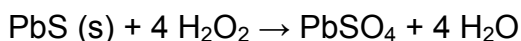
Se utiliza en la fabricación de otros productos químicos (30%) y de productos de limpieza (20%).

Su principal uso es como oxidante, en especial, como agente blanqueador de pasta de papel y textiles (30%). Las sustancias de origen animal como lana, pelos, pieles, se deterioran con otros agentes de blanqueo como el hipoclorito o el SO_2 .

En el laboratorio se usa en la oxidación de azufre, nitrógeno y yoduros.

Se utiliza como germicida (dis. al 3%): destruye gérmenes patógenos. Inhibe el crecimiento de todos los gérmenes anaerobios. Actúa como desodorante y antiséptico bucal. Destrucción de materia orgánica.

Blanqueador de pinturas. Un pigmento blanco frecuente tiene de composición $\text{Pb}_3(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2$ se deteriora por efecto de la polución generando PbS negro. El proceso de restauración consiste en la oxidación del sulfuro con agua oxigenada⁸:



El peróxido de hidrógeno es también uno de los agentes oxidantes más poderosos, versátiles y ambientalmente compatibles. Se asemeja al agua en su apariencia, fórmula química y en los productos de la reacción.⁹

En la industria, el peróxido de hidrogeno se usa en concentraciones más altas para blanquear telas y pasta de papel, como componente de combustibles para cohetes y para fabricar espumas de caucho y sustancias químicas orgánicas. En otras áreas como la investigación se utiliza para medir la actividad de algunas enzimas como la catalasa.

Además el peróxido de hidrogeno se emplea en trabajos de restauración, e pinturas antiguas.

Puede ser un desinfectante efectivo, ya que su mecanismo de acción se debe a la efervescencia que produce, liberando el oxígeno que destruye los microorganismos anaerobios y el burbujeo de la solución cuando entra en contacto con los tejidos y ciertas sustancias químicas, expulsa restos titulares fuera del conducto.

Puede incluso usarse en el control del olor, control de la corrosión, el retiro de la DBO/DQO, la oxidación orgánica, la oxidación de metales y la oxidación de la toxicidad.

Puede ser combinado con diversos procesos para mejorar los resultados, por ejemplo: floculación/precipitación, flotación de aire, biotratamiento, filtración, adsorción del carbón, depuradores del aire e incineración.

Tiene aplicación como inhibidor de desarrollo bacteriano y como blanqueador en los filtros hemodializadores.

En la industria alimenticia se usa mucho para blanquear quesos y también se usa en el proceso para la elaboración de aceites vegetales.

En la industria química se usa como reactivo y es muy importante en la elaboración de fármacos.

Tabla 4. Agentes oxidantes más empleados en la industria.

Agentes oxidantes	Potencial de oxidación, V
Flúor	3,0
Radical hidroxil	2,8
Ozono	2,1
Peróxido de hidrógeno	1,8
Permanganato de potasio	1,5
Cloro	1,7
Chlorine	1,4

3.8.5. Ventajas

Las ventajas del peróxido de hidrógeno:

- **Poderoso:** El peróxido de hidrógeno es uno de los más poderosos oxidantes de que se tiene conocimiento, más potente que el cloro y el permanganato de potasio. Además, a través de la adición de un catalizador apropiado, el peróxido de hidrógeno puede ser convertido en radicales de hidroxil ($\cdot\text{OH}$) con una capacidad de oxidación sólo superada por el flúor.
- **Seguro:** A pesar de su poder, el peróxido de hidrógeno es un metabolito natural para muchos organismos, los cuales descomponen el peróxido de hidrógeno producido en oxígeno y agua. El peróxido de hidrógeno también es creado por la radiación de la luz solar sobre el agua - un sistema de purificación natural de nuestro ambiente. Consecuentemente, el peróxido de hidrógeno no comparte de ningún de los problemas asociados a otros agentes oxidantes como las emanaciones gaseosas y los residuos químicos. Y una vez que el peróxido de hidrógeno es completamente miscible en agua, la cuestión de la seguridad tiene que ver con su concentración. El peróxido de hidrógeno

de fuerza industrial es un poderoso oxidante y como tal requiere precaución especial en su manipulación. Alron encontró un nivel de concentración que optimiza el binomio eficiencia y seguridad.

- **Versátil:** El hecho del peróxido de hidrógeno poder ser usado para aplicaciones aparentemente opuestas es una prueba de su versatilidad. Por ejemplo, puede inhibir el crecimiento microbiológico (como en el saneamiento biológico de conductos de agua), pero también puede estimular el crecimiento microbiano (como en el saneamiento biológico de suelos y aguas contaminadas). De igual modo, puede tratar contaminantes que son fáciles de oxidar (hierro y sulfitos) y contaminantes difíciles de sanear como disolventes, gasolina y pesticidas.
- **Selectivo:** La razón por la cual el peróxido de hidrógeno puede ser usado en tan diversas aplicaciones es que existen diversas formas hacia las que su poder puede ser dirigido. Esto se define como selectividad. Simplemente ajustando las condiciones de su reacción (esto es, pH, temperatura, dosis, tiempo de reacción y/o aditivo catalizador), se puede llevar el peróxido de hidrógeno a oxidar un contaminante en vez de otro, o incluso a formar diferentes productos oxidantes a partir del mismo contaminante.
- **Ampliamente utilizado:** Desde que comenzó a ser comercializado alrededor de 1800, la producción de peróxido de hidrógeno creció por encima de las 500.000 toneladas el año. A sumar a la desinfección y control de olores, el peróxido de hidrógeno es ampliamente utilizado en el control de la polución, para decolorar textiles y papel, y para producir alimentos, minerales derivados del petróleo y productos de consumo común (detergentes).

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. MARCO GEOGRÁFICO

La zona de clarificación de meladura está ubicada en el área de Elaboración del Ingenio Risaralda S.A. El cual geográficamente se encuentra en el municipio de Balboa departamento de Risaralda. Aunque está más cerca de la zona urbana del municipio de La Virginia a 2km vía La Virginia - Balboa a orillas del río Risaralda.

La sociedad INGENIO RISARALDA S.A. se fundó en 1.973 con la participación inicial de la Federación Nacional de Cafeteros, COFIAGRO, el Instituto de Fomento Industrial -IFI-, la Corporación Financiera de Occidente y un grupo de propietarios de tierras de la región.

El Ingenio Risaralda S.A, es el más joven del país y aprovecho el valle de Risaralda para crear una Empresa Agroindustrial dedicada al cultivo y transformación de la caña de azúcar. De esta manera, busca satisfacer competitivamente las necesidades y expectativas de los clientes con productos y servicios de alta calidad. Para ello, capacita, forma y estimula el talento humano e invierte en equipos, tecnología e infraestructura, buscando siempre generar un mayor valor agregado y un mejoramiento continuo del rendimiento del proceso.

El sector azucarero Colombiano, ha venido creciendo durante los últimos años hasta llegar a ser uno de los principales pilares de producción y exportación del país, gracias a su constante desarrollo tecnológico y a su visión de ser empresa de categoría mundial.

4.2. TIPO DE ESTUDIO

Investigativo

4.3. ANTECEDENTES

Dentro del contexto industrial, El Ingenio Risaralda S.A. no ha desarrollado ningún estudio o prueba sobre el poder de clarificación del peróxido de hidrogeno (H_2O_2) en la meladura. Se ha tenido conocimiento de su posible uso actualmente en algunos Ingenios del país y en otros de Sur América, con resultados poco alentadores en algunos casos.

El Ingenio Rio Paila hace más de un año emplea Peróxido de Hidrogeno para remover color en licor fundido en el proceso de obtención de azúcar refinada, reemplazando los métodos de carbonatación y sulfitación los cuales mostraron problemas al dejar residuos en el material en proceso, contaminando finalmente el azúcar.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

5.1. PUNTOS DE MUESTREO

- Meladura sin clarificar (cruda): salida del evaporador 6 o penúltimo efecto.
- Meladura clarificada: salida del tanque clarificador de meladura antes de conducirse hacia el ultimo efecto o concentrador.

5.2. TOMA DE MUESTRAS

- Las muestras de meladura sin clarificar se tomaron durante el proceso a la salida regularmente del evaporador No. 6, el cual realiza el penúltimo efecto según sea el caso. El evaporador en su parte inferior está provisto de un dispositivo con válvulas que permiten la toma de muestra directamente de la meladura que se está concentrando o se puede componer una muestra dentro de este durante un tiempo previamente establecido.

Figura 9. Punto de muestreo Evaporador No.6



Para el análisis en cuestión se realizaba primero una limpieza de la línea, que consistía en abrir ambas válvulas del dispositivo al mismo tiempo y dejar salir una cantidad indeterminada de meladura con el fin de producir un efecto de barrido en la línea, eliminando cualquier partícula o residuo viejo atrapado en ella.

Las muestra tomadas eran aproximadamente de 1000 ml y eran analizadas inmediatamente. La frecuencia para dicho proceso no tenía periodicidad.

Figura 10. Vista completa evaporador Ingenio Risaralda S.A.



- Las muestras de meladura clarificada fueron tomadas a la salida del tanque clarificador. Allí la meladura llega después de ser sulfitada y durante un tiempo de retención aproximado de 60 minutos, se lleva a cabo la separación por flotación de las partículas que no son útiles en el proceso de producción de azúcar.

Figura 11. Punto de muestreo salida clarificador de meladura.



Figura 12. Tanque clarificador de meladura Ingenio Risaralda S.A.



Las muestras en ambos casos eran tomadas el mismo día con una diferencia de tiempo de 10 minutos aproximadamente, con el fin de analizar un material con características similares.

5.3. PROCESOS INDUSTRIALES DE CLARIFICACION

5.3.1. Clarificación con SO₂ en el Ingenio Risaralda S.A.

El sistema en estudio consta de un horno rotatorio, un apagallamas, dos torres de absorción y un eductor.

5.3.1.1. Insumos

- Azufre sólido granulado.

5.3.1.2. Especificaciones de los equipos

- Horno rotatorio con capacidad interna de 0.375 m³.
- Torres de absorción con unas dimensiones de 1.2 m x 1.2 m x 6.0 m c/u. Madera tipo nato rojo con telares de 0.03 m x 0.20 m x 3.0 m.

31 parrillas interiores en madera de 0.05 m x 0.15 m.

- Eductor el cual realiza el vacío con jugo a presiones de 40-50psi, recubierto en fibra de vidrio.

5.3.1.3. Procedimiento

El azufre granulado es depositado manualmente a una tolva la cual alimenta el horno rotatorio dándose allí la combustión del azufre, para luego pasar al apagallamas, el cual es una recámara recubierta internamente de material refractario cuyo objetivo es retener partículas encendidas de azufre al tener una configuración en forma de laberinto.

Los gases obtenidos son transportados por una tubería enchaquetada donde se enfrían, para luego entrar a la torre de absorción por la parte inferior; el jugo proveniente de molinos o la meladura (según sea la necesidad), entra por la parte superior de la torre y desciende por ella en forma de cascada debido al diseño interior de la misma, el cual está conformada por un entramado de madera, los gases son así halados por el eductor y entran en contacto con el jugo o meladura en contracorriente. Los gases pobres son expulsados a la atmósfera por la parte superior de la torre.

5.3.2. Clarificación con Peróxido de Hidrógeno 50% (prueba en planta)

El método sometido a evaluación, es la aplicación o goteo de Peróxido de Hidrogeno 50% grado alimento directamente en la meladura antes de entrar al tanque clarificador.

Para realizar una exitosa comparación entre el método de sulfitación de meladura y la aplicación de Peróxido de Hidrogeno a la misma, en el proceso de eliminación de color se realizó una prueba en planta durante un periodo de 12 horas aproximadamente, bajo las mismas condiciones en que diariamente está sometido el proceso de producción de azúcar.

Antes de realizar la prueba fue necesario realizar unos pequeños ajustes que permitieran y aseguraran que el proceso de aplicación de Peróxido de Hidrogeno fuera continuo y similar al proceso establecido, con el fin de minimizar posibles errores provocados por un montaje mal planeado.

5.3.2.1. Insumos

- Peróxido de Hidrogeno 50% Grado Alimento. (3 Tambores de 72 Kg. c/u)

Figura 13. Tambor de 72 Kg.



5.3.2.2. Equipos y materiales

- Bomba Peristáltica
- Manguera Norprene Pharmed

Figura 14. Bomba peristáltica



5.3.2.3. Procedimiento

Teniendo en cuenta que el proceso empleado para la eliminación del color de la meladura es la sulfitación, fue necesario detener dicho proceso aproximadamente dos horas antes para evitar interferencias y resultados poco confiables en el producto final.

El proceso de clarificación se lleva a cabo en un tanque clarificador tipo abierto.

Contiguo al clarificador está ubicado un tanque de reacción con agitador, donde se mezcla la meladura con un tensoactivo, esto con el fin de reducir la cantidad de espuma que se genera en el proceso; en este sitio se localizo la dosificación del Peróxido de Hidrógeno y se suspendió la adición de tensoactivo durante la prueba.

Figura 15. Tanque de reacción contiguo al tanque clarificador de meladura.



Se empleó una bomba dosificadora, en este caso la más recomendable fue de tipo peristáltico, ya que de esta forma evitamos que el producto tenga contacto con partes metálicas que reaccionen oxidándose fácilmente. La ubicación de la bomba estuvo al mismo nivel de la base del tanque de reacción y de esta se derivó la manguera que inicia dentro de la boca de la garrafa plástica que contiene el peróxido de hidrógeno (situada en el suelo o primer nivel de la planta), y llega hasta el tanque de reacción. A través de esta manguera es captado el producto y dosificado a razón de 200 ml/min, cantidad recomendada por los proveedores.

En el momento que comienza la dosificación del peróxido de hidrógeno se toman muestras de la meladura antes de ser sometida al proceso de clarificación. Se requiere un tiempo de retención del producto de aproximadamente 60 minutos, a partir de este lapso se comienzan a tomar muestras de meladura antes de entrar al clarificador (salida del evaporador 6) y muestras de meladura a la salida del clarificador.

A partir de allí el proceso continúa normalmente hasta la obtención del azúcar.

Las muestras tomadas aproximadamente cada hora a partir del inicio de la dosificación del peróxido de hidrógeno se transportaban de inmediato al laboratorio de calidad de conformidad para los respectivos análisis.

5.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

5.4.1. Equipos

- Balanza analítica Mettler Toledo
- Equipo medidor de pH. Metrhom
- Refractómetro HACH 2100 N Turbidimeter
- Polarímetro SACCH AAr 880 Nir Polarimeter
- Equipo de filtración con membrana al vacio
- Espectrofotómetro Genesys Louv. Cienytec
- Agitador magnético Corning
- Conductímetro

5.4.2. Material de vidrio

- Vasos de precipitados de 100, 250 y 1000 ml
- Pipetas graduadas de 1, 5 y 10 ml
- Pipetas volumétricas de 5 y 20 ml
- Balones volumétricos de 100, 500 y 1000 ml
- Embudos en forma de V
- Celda de cuarzo con 1 cm de espesor
- Capsula de porcelana

5.4.3. Reactivos

- Ayuda filtrante
- Cal
- Sulfato de aluminio
- Hidróxido de sodio 0,1 N

- Ácido clorhídrico 50% y 0,1 N
- Solución de almidón al 1%
- Yoduro yodato de Potasio 0,0125 N
- Solución de Cloruro de potasio 0,1 y 0,0002 M
- Agua destilada

5.4.4. Otros implementos de laboratorio

- Filtros de membrana
- Filtros de papel
- Soporte metálico
- Pinzas para soporte

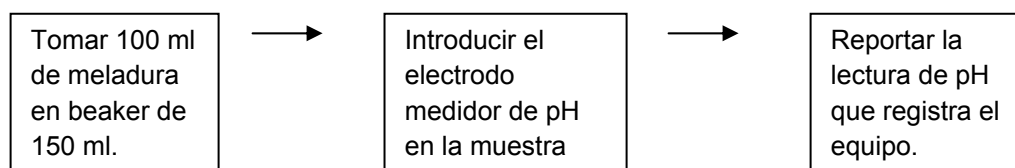
5.4.5. Equipos de Protección Personal

- Indumentaria limpia
- Delantal blanco
- Gafas de protección

5.5. ANALISIS DE LABORATORIO

Las muestras que se toman de meladura antes y después de ser clarificada se enfriaban hasta temperatura ambiente y luego simultáneamente se sometían a los siguientes análisis.

5.5.1. Determinación de pH en meladura (Método 7)

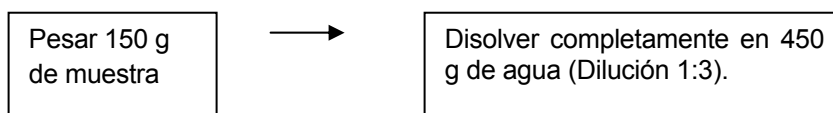


5.5.2. Determinación de Grados Brix (Método 1123)

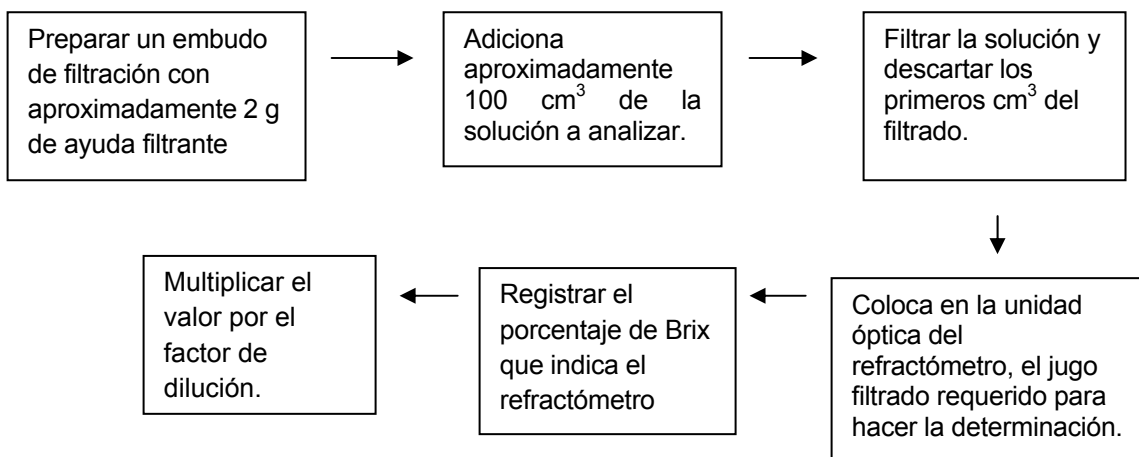
Se determinan Grados Brix en la meladura, por el método refractométrico, con el fin de conocer el estado del material en proceso.

Método Refractométrico: Consiste en la variación del índice de refracción de un haz de luz, al atravesar una solución de azúcar, a la longitud de onda del sodio.

- **Preparación de la muestra**

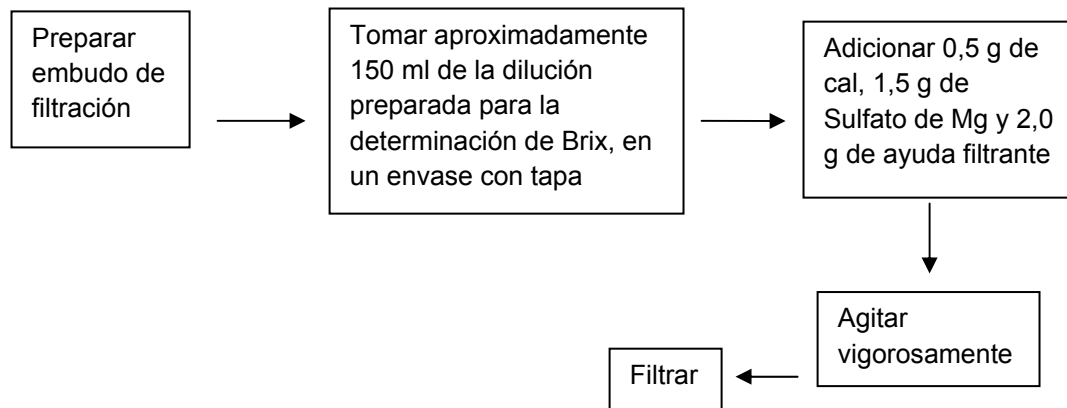


- **Método Refractométrico**

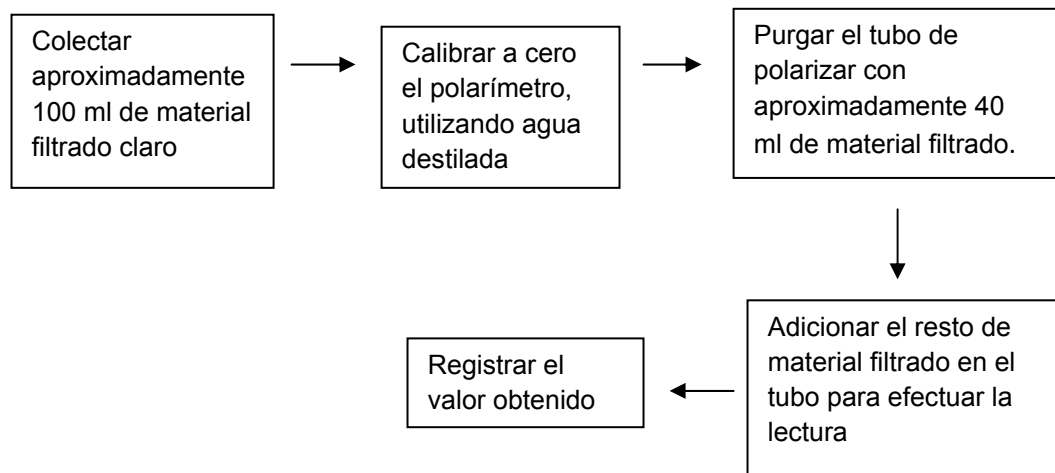


5.5.3. Determinación de sacarosa (Método 1127).

- **Preparación de la muestra**



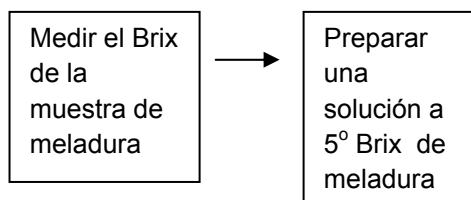
- **Análisis**



5.5.4. Ensayo para determinar el color y la turbiedad en meladura (Método 1147)

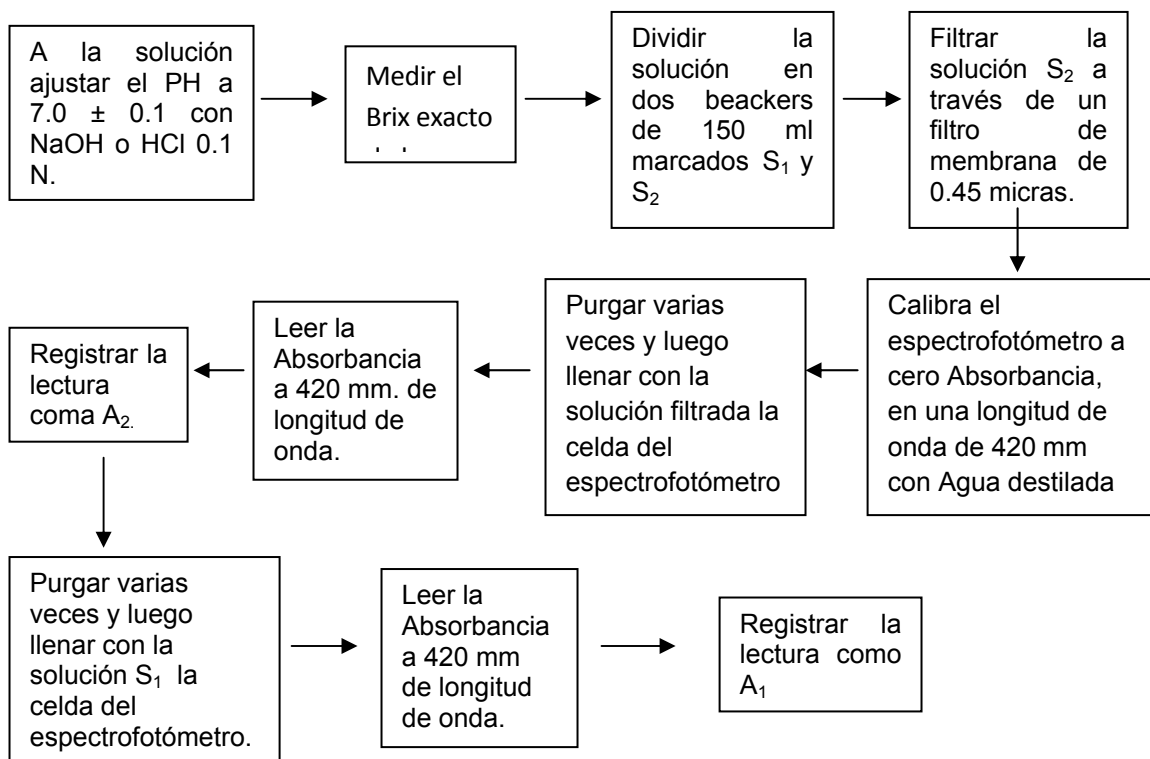
Este análisis es empleado para controlar a nivel de proceso en planta las variables que influyen directamente en el color del producto final, ya que entre mejor sea el manejo de la meladura en proceso mejor serán los resultados y se tendrá un azúcar mas blanca.

- **Preparación de la muestra**



$$\text{Peso de muestra para luego ajustar a 100 g totales con agua destilada} = \frac{\text{Brix requeridos} \times 100}{\text{Brix muestra original}}$$

- **Análisis**



Se obtiene el color de la muestra mediante la siguiente fórmula.

$$\text{Color a 420 nm} = \frac{A_2 \times 1000}{b \times c}$$

Donde: A_2 : Lectura de Absorbancia de la muestra filtrada (S_2)

b : Longitud de la celda en cm

c : Concentración de la solución en g/cc

Se obtiene la turbiedad de la muestra mediante la siguiente formula.

$$\text{Turbiedad} = \frac{(A_1 - A_2) \times 1000}{b \times c}$$

Donde: A_1 : Absorbancia de la muestra sin filtrar (S_1)

A_2 : Absorbancia de la muestra filtrada (S_2)

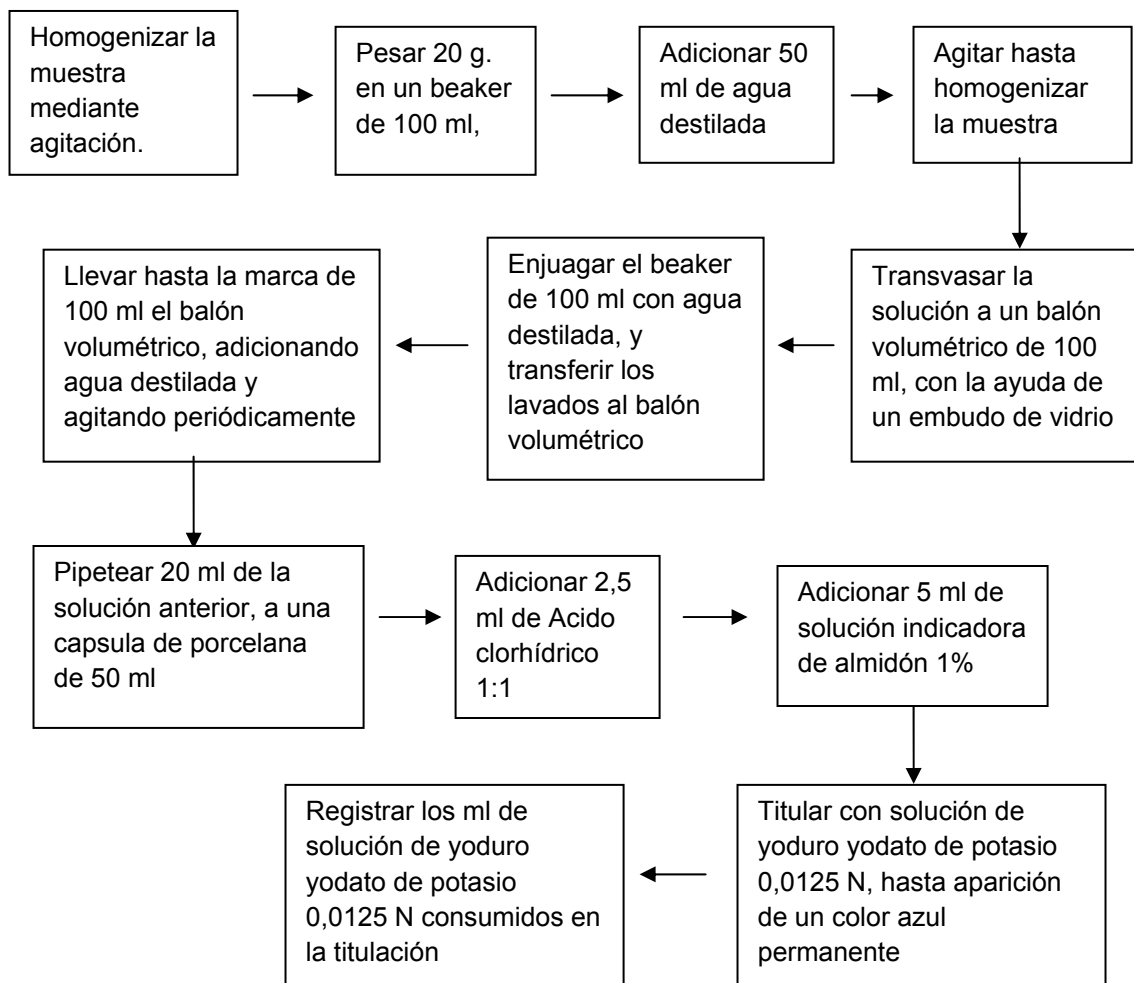
b : Longitud de la celda en cm

c : Concentración de la solución en g/cc

5.5.5. Determinación de Dióxido de Azufre (SO_2) en miel virgen (Método 1121)

Este método fue empleado únicamente en la meladura sometida a sulfitación y fue tratada bajo las mismas condiciones que la miel virgen, puesto que el material daba esa posibilidad por su naturaleza.

- **Análisis**



Calcular el % de SO₂ de la siguiente manera:

$$\% \text{ SO}_2 = \frac{V \times N \times 32}{40}$$

Donde: V: Volumen en mililitros de la solución Yoduro yodato de potasio 0,0125N consumidos en titulación.

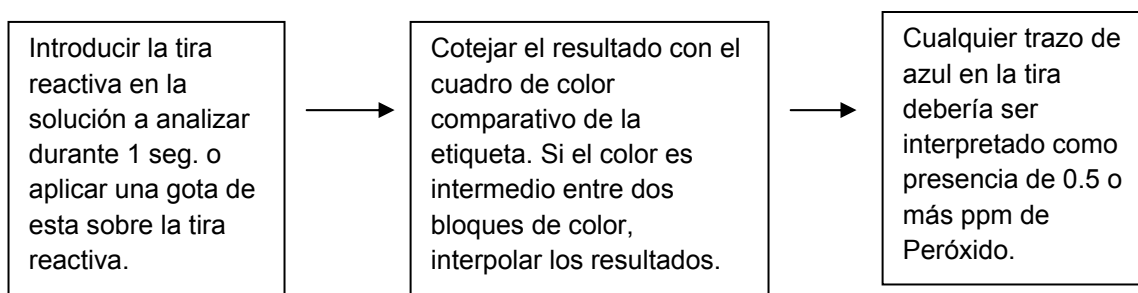
 N: Normalidad del yoduro yodato de potasio

 32, 40: Son constantes

5.5.6. Determinación de Peróxido de Hidrogeno (H₂O₂) residual

Este análisis se realizó con una cintillas o tiras reactivas Merck, estas se basan en la reacción del Peróxido de Hidrogeno con un indicador de reducción a una cromatología azul.

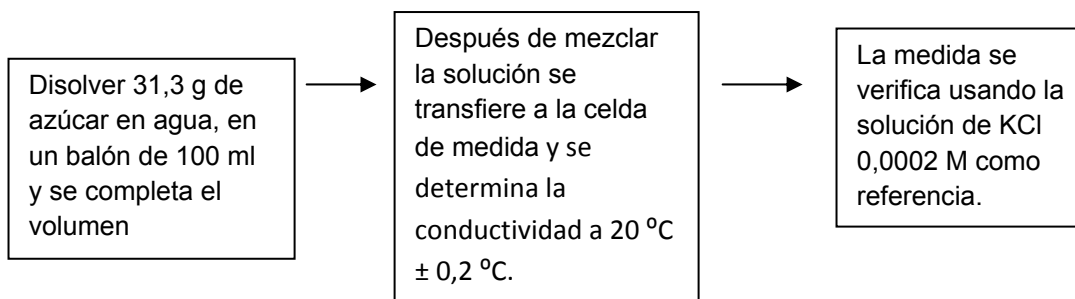
Las tiras reactivas son para detección de residual de Peróxidos pero pueden reaccionar fácilmente con Acido Peracético, u otros agentes oxidantes. Por esto se recomendable siempre manipular las tiras reactivas con las manos secas. Solo retirar del envase la tira que va a utilizarse y volver a cerrarlo inmediatamente. La exposición de las tiras reactivas a la luz y humedad puede causar alteraciones en la misma y generar un falso positivo en el resultado. No utilizar la tira si ya esta coloreada antes de utilizarla. No tocar la almohadilla de la tira con los dedos o ninguna otra superficie.



5.5.7. Contenido de ceniza en azúcar crudo (NTC 570).

Determinación conductométrica

Se determina la conductividad especifica de una solución de azúcar a una concentración de 28 g/100 g. El equivalente de cenizas se calcula mediante la aplicación de un factor convencional.



La conductividad se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$C_{28} = C_1 - 0,35C_2$$

$$\% \text{ (cenizas conductimétricas)} = 6 \times 10^{-4} \times C_{28}$$

Donde: C_{28} : Conductividad corregida de la solución de azúcar (28 g/100 g solución), expresada en $\mu\text{S/cm}$.

C_1 : Conductividad medida en $\mu\text{S/cm}$ a 20 °C.

C_2 : Conductividad del agua a 20 °C.

Corrección de temperatura: si la determinación de la conductividad se hace a una temperatura diferente de 20 °C, se debe hacer la siguiente corrección:

$$C_{20\text{ °C}} = \frac{C_T}{1 - 0.026(T-20)}$$

Donde: $C_{20\text{ °C}}$: Conductividad a 20 °C.

C_T : Conductividad a la temperatura de T °C.

Debe procurarse que la temperatura de la medida no exceda de $\pm 5\text{ °C}$ la temperatura de referencia (20 °C).

Si la conductividad de la solución de referencia de cloruro de potasio no puede ser medida a 20 °C se determina la conductividad a esta temperatura mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Conductividad de KCl a T °C} = 26,6 (1+0,021 (T-20))$$

6. DATOS, RESULTADOS Y DISCUSION

El objetivo principal de la prueba realizada en la planta de elaboración de azúcar del Ingenio Risaralda S.A, fue determinar la efectividad como agente clarificador del Peróxido de hidrogeno 50 % wt.

Para tal fin se realizó, a lo largo de tres meses, análisis para determinar la cantidad de color removido mediante el método de sulfitación continua.

De esta manera se obtuvo valores a lo largo del tiempo que demostraron las variaciones que se pueden presentar en los resultados, ya que el material, en este caso la meladura, no presenta características exactamente iguales diariamente. El proceso se ve afectado desde la calidad de la tierra donde crece la caña, el clima de la zona y posteriormente el proceso de corte, levante y transporte. Y se refleja en los parámetros del jugo de la caña como rendimiento de sacarosa, acidez y contenido de sustancias coloreadas.

6.1. SULFITACION CONTINUA

Los análisis fueron realizados a muestras puntuales de meladura sometida a sulfitación sin frecuencia determinada durante los meses de Noviembre, Diciembre de 2006 y Enero de 2007.

Tabla 5. Datos de meladura cruda

MELADURA SIN CLARIFICAR				
Dia	pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)
1	6.2	41.14	10865.19	1730.38
2	6.12	46.78	11146.88	1287.73
3	6.35	51.79	10469.67	2035.73
4	6.44	50.52	10244.9	3040.82
5	6.79	42.19	11759.83	3623.19
6	6.29	49.68	10802.35	4109.59
7	6.37	56.73	10874.2	4243.07
8	6.21	56.45	9393.35	1663.41
9	6.06	46.59	14833.66	2348.34
PROMEDIO			11154.45	2675.81
DESVIACION ESTANDAR			1524.26	1112.73

Grafico 3. Variación de color y turbiedad de meladura cruda

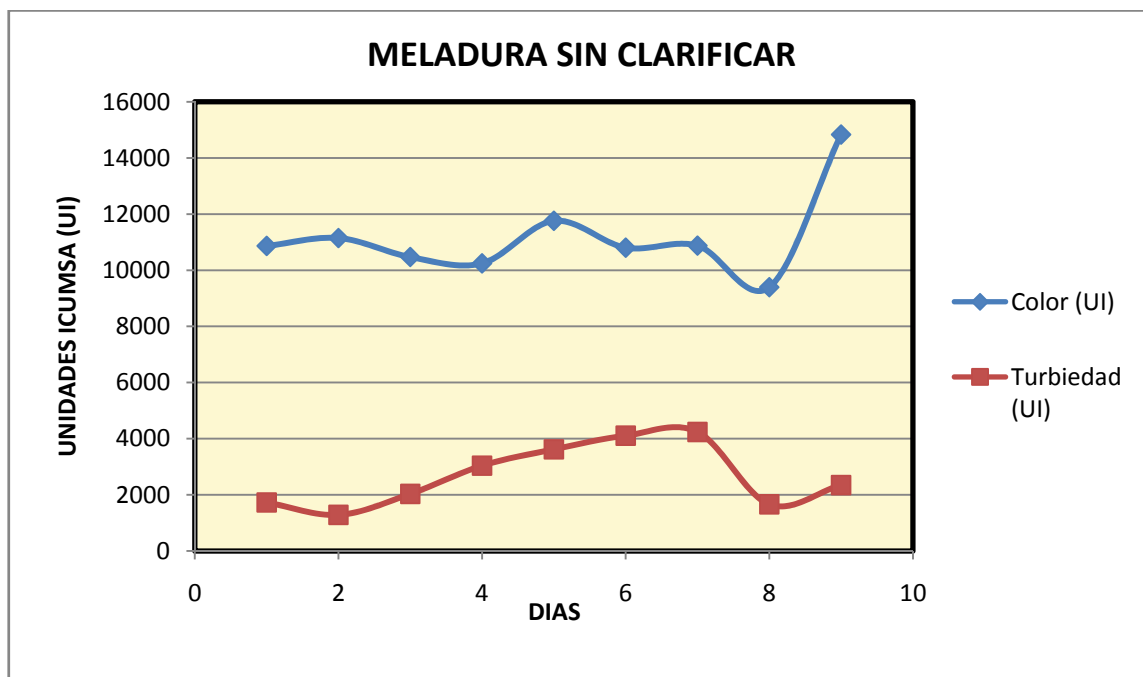
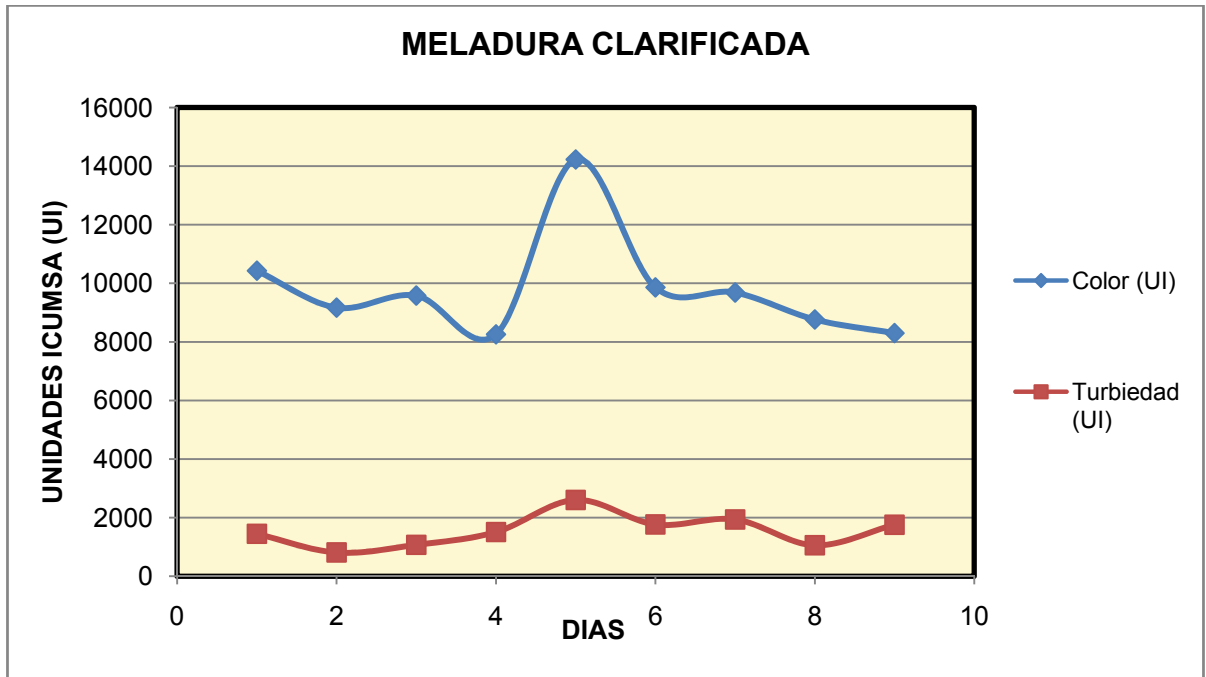


Tabla 6. Datos de meladura después de ser sulfitada y clarificada

MELADURA CLARIFICADA					
Dia	pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)	Residual de SO ₂ (ppm)
1	6.91	42.14	10430.53	1448.14	0.00400
2	6.69	47.51	9169.88	810.81	0.01040
3	5.94	52.58	9583.33	1071.43	0.01544
4	6.11	46.11	8258.32	1506.85	0.00930
5	6.23	44.81	14227.01	2602.74	0.01170
6	7.32	49.87	9861.11	1765.87	0.00824
7	7.02	51.03	9686.89	1937.38	0.01753
8	7.44	51.2	8767.12	1056.75	0.01195
9	6.66	49.7	8301.16	1756.76	0.02125
PROMEDIO			9809.48	1550.75	0.01220
DESVIACION ESTANDAR			1807.82	545.28	0.00519

Grafico 4. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada



Los gráficos 3 y 4 muestran los rangos y las diferencias en los parámetros de color y turbiedad. Comparando los datos y teniendo en cuenta que el material sin clarificar fue tomado el mismo día del material clarificado se observa que la eliminación de color esta alrededor de 1000 a 2000 UI.

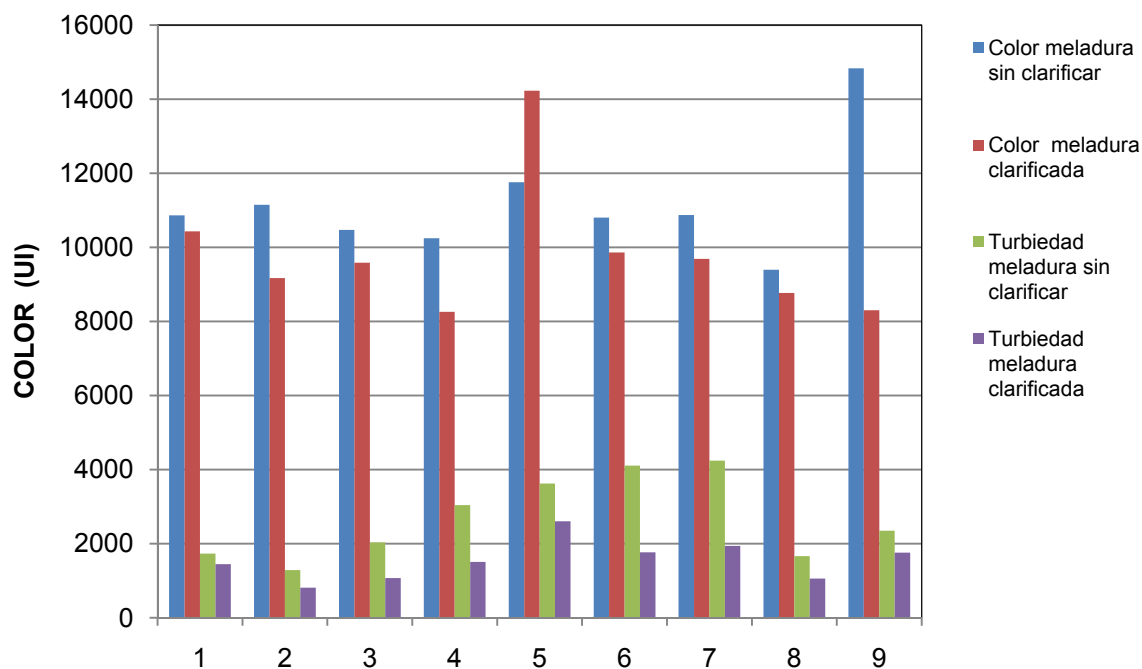
Es necesario tener en cuenta los demás parámetros del material ya que todos ellos son indicadores de la calidad de este. Después de clarificada la meladura presenta un aumento en el pH y en los grados Brix, mostrando una aumento en la calidad del material en proceso el cual seguramente se verá reflejado en el producto final.

El residual de SO_2 presento datos muy bajos dentro del parámetro, lo que no quiere decir que se convierte en algo benéfico para el ambiente, aunque en baja proporción se continúa obteniendo residual.

Tabla 7. Datos comparativos de color y turbiedad en meladura sin clarificar y meladura clarificada.

Dia	Color meladura sin clarificar (UI)	Color meladura clarificada (UI)	Turbiedad meladura sin clarificar (UI)	Turbiedad meladura clarificada (UI)
1	10865,19	10430,53	1730,38	1448,14
2	11146,88	9169,88	1287,73	810,81
3	10469,67	9583,33	2035,73	1071,43
4	10244,9	8258,32	3040,82	1506,85
5	11759,83	14227,005	3623,19	2602,74
6	10802,35	9861,11	4109,59	1765,87
7	10874,2	9686,89	4243,07	1937,38
8	9393,35	8767,12	1663,41	1056,75
9	14833,66	8301,16	2348,34	1756,76
Promedio	11154,44778	9809,482778	2675,806667	1550,747778

Grafico 5. Comparativo de color y turbiedad entre meladura sin clarificar y meladura clarificada



- **Color:** La meladura sin clarificar está en un rango de 10000 a 12000 UI.

La meladura clarificada en su mayoría se ubica en un rango de 8000 a 10000 UI.

- **Turbiedad:** La meladura sin clarificar se encuentra dentro de un rango de 1000 a 4000 UI.

La meladura clarificada esta en un rango aproximado de 1000 a 2500 UI.

Realizando una comparación en el Grafico 5, es posible observar de manera clara la capacidad de remoción de color con el método de sulfitación continua. Esto demuestra que aunque es un método antiguo y contaminante es efectivo para el propósito para el cual está destinado.

Tabla 8. Datos de sacarosa y pureza en meladura

Dia	Meladura sin clarificar		Meladura clarificada	
	% Sacarosa	Pureza	% Sacarosa	Pureza
1	9.340	0.904	9.543	0.900
2	10.520	0.895	10.700	0.894
3	11.770	0.909	11.945	0.906
4	11.270	0.889	10.262	0.885
5	9.658	0.903	9.597	0.849
6	11.300	0.902	11.170	0.900
7	12.828	0.898	11.472	0.891
8	12.800	0.899	11.560	0.900
9	10.520	0.898	11.250	0.901
PROMEDIO	11.112	0.900	10.833	0.892
DES. ESTANDAR	1.237	0.006	0.866	0.017

Paralelamente a los análisis de color se determino % de sacarosa y pureza antes y después de someter el material a remoción de color y se pudo observar que en la mayoría de muestras se produjo un aumento en el % de sacarosa, indicando así que el método no interfiere con el rendimiento del material.

En el caso de la pureza no se presenta una variación significativa en dicho parámetro.

Tabla 9. Promedio mensual de color, turbiedad y cenizas en azúcar crudo

MES	COLOR(U.I.)	TURB.(U.I.)	CENIZAS(%)
Octubre	278	76	0.0703
Noviembre	441	148	0.0617
Diciembre	871	273	0.0636

Estos datos indican el promedio mensual de color, turbiedad y el porcentaje de cenizas analizado en el azúcar crudo producido en el Ingenio Risaralda S.A.

6.2. PEROXIDO DE HIDROGENO 50% wt.

6.2.1. Prueba # 1: dosificación 200 ml/min

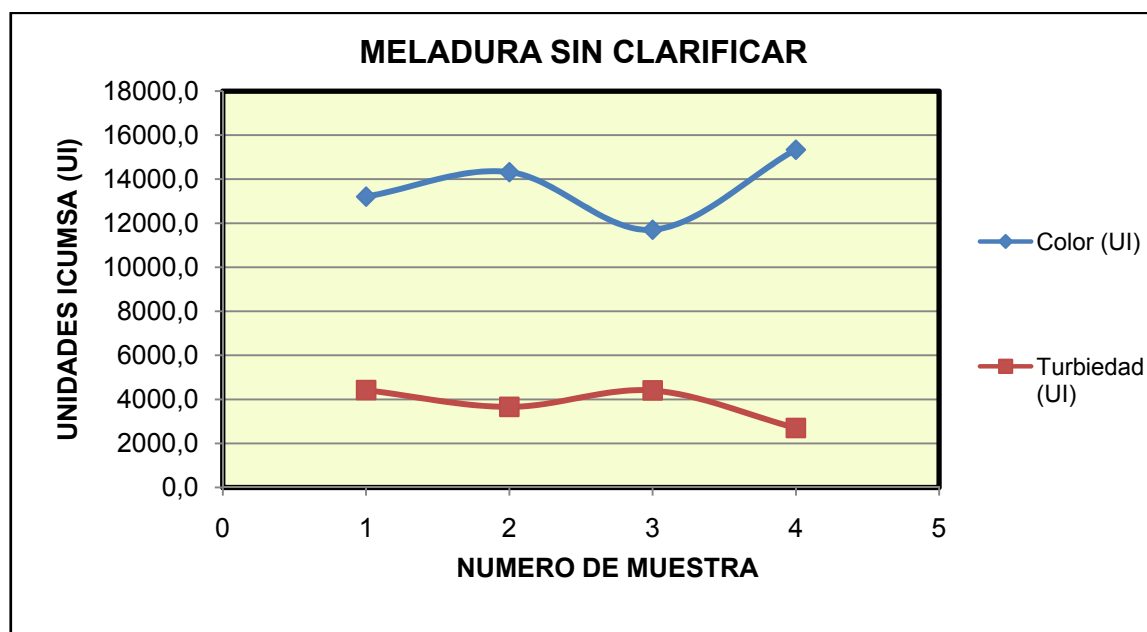
La prueba en la planta de elaboración de azúcar realizada para obtener datos acerca de la capacidad de clarificación de este método inicialmente se llevo a cabo aplicando el producto a razón de 200 ml/min, esto se determino previamente basado en el flujo de meladura que entra al clarificador aproximado de 60 – 80 m³/h y su tiempo de retención es de aproximadamente 60 minutos. Tiempo durante el cual el peróxido logra dentro de su capacidad remover el mayor contenido de partículas coloreadas además de realizar un proceso de desinfección. Por su gran poder oxidante el peróxido de hidrogeno se consume completamente en el material dando nulo a su contenido de peróxido residual.

Tabla 10. Datos obtenidos durante la prueba en planta con peróxido de hidrogeno (200 ml/min) en el Ingenio Risaralda.

MELADURA SIN CLARIFICAR				MELADURA CLARIFICADA				
pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)	pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)	Residual de H ₂ O ₂ (mg/L)
6.13	50.60	13209.4	4422.0	7.25	46.96	11289.7	1250.0	0
6.28	50.32	14324.0	3659.0	7.22	48.03	10673.0	1722.0	0
6.20	48.92	11706.0	4405.0	7.27	48.03	10822.0	1605.0	0
6.25	47.83	15342.5	2700.0	7.18	44.38	11604.7	1467.7	0
PROMEDIO		13645.5	3796.5	PROMEDIO		11097.3	1511.2	0
DESV. ESTANDAR		1559.0	813.0	DESV. ESTANDAR		428.3	202.8	0

Observando los datos de pH y °Brix del material durante el proceso se observó un comportamiento normal. La meladura sin clarificar maneja valores de pH entre 6 y 7 y Brix desde 46 hasta 55 aproximadamente y estos valores cambian en la meladura clarificada debido a la adición de lechada de cal y algunas veces material que se recircula de proceso para aprovechar todo el contenido de sacarosa existente en este.

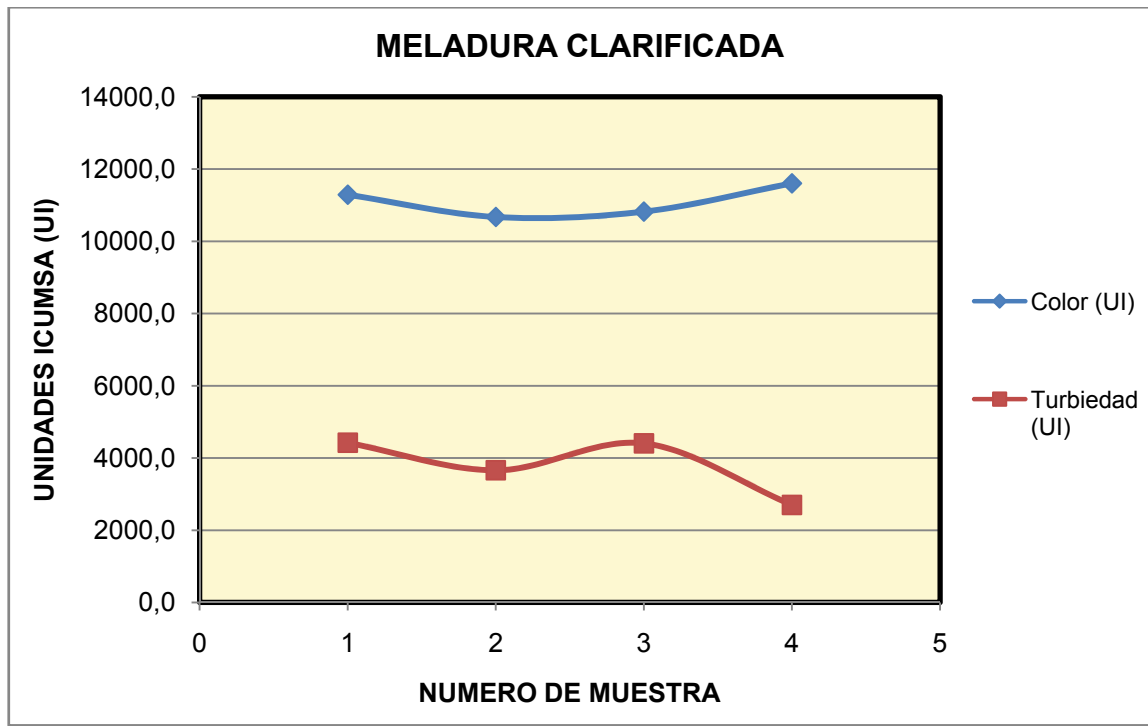
Gráfico 6. Variación de color y turbiedad de meladura cruda



Los datos de color y turbiedad para estas muestras de meladura sin clarificar arrojaron resultados altos en comparación con las tomadas en días anteriores, se debe tener en cuenta que dichas muestras representan un solo día ya que este fue el tiempo de duración de la prueba y las características del material fueron diferentes.

Los datos de color están dentro de un rango de 13000 a 15000 UI, mientras que los datos de turbiedad están dentro de un rango de 2700 a 4500 UI.

Grafico 7. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada



Los datos de color están dentro de un rango de 10600 a 11600 UI, y los datos de turbiedad están dentro de un rango de 1200 a 1800 UI aproximadamente.

La primera parte de la prueba consistió en bombear el Peróxido de Hidrogeno con un flujo de 200 ml/min. Las muestras fueron analizadas inmediatamente y se observó una disminución en los valores de color hasta de 3000 UI.

Esta primera parte arrojó buenos resultados demostrando que la capacidad de remoción de el nuevo producto es superior además de los beneficios extras que proporciona este, como la reconocida desinfección, la cantidad de peróxido residual, la mínima contaminación en el ambiente, y a largo plazo la posibilidad de disminuir incrustaciones en tuberías y evaporadores.

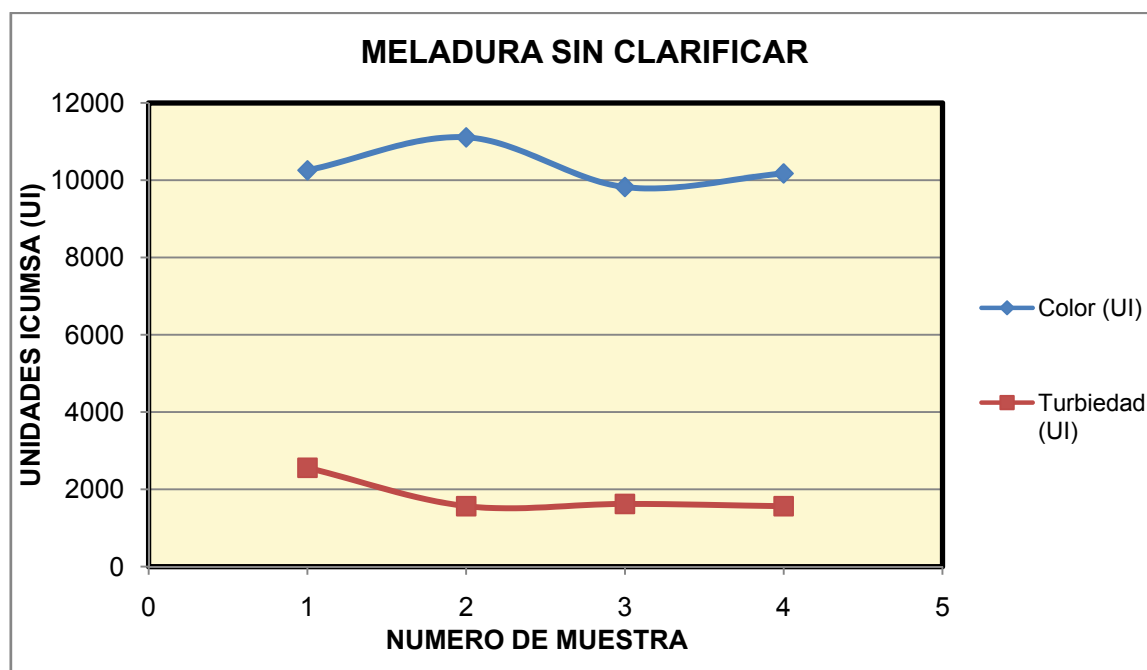
6.2.2. Prueba # 2: dosificación 170 ml/min

La segunda parte de la prueba se realizó dosificando peróxido de hidrogeno a razón de 170 ml/min, con el fin de obtener el flujo ideal para una remoción efectiva evitando así desperdicio de producto además de prevenir la inversión de sacarosa por exceso de producto.

Tabla 11. Datos obtenidos durante la prueba en planta con peróxido de hidrogeno (170 ml/min) en el Ingenio Risaralda.

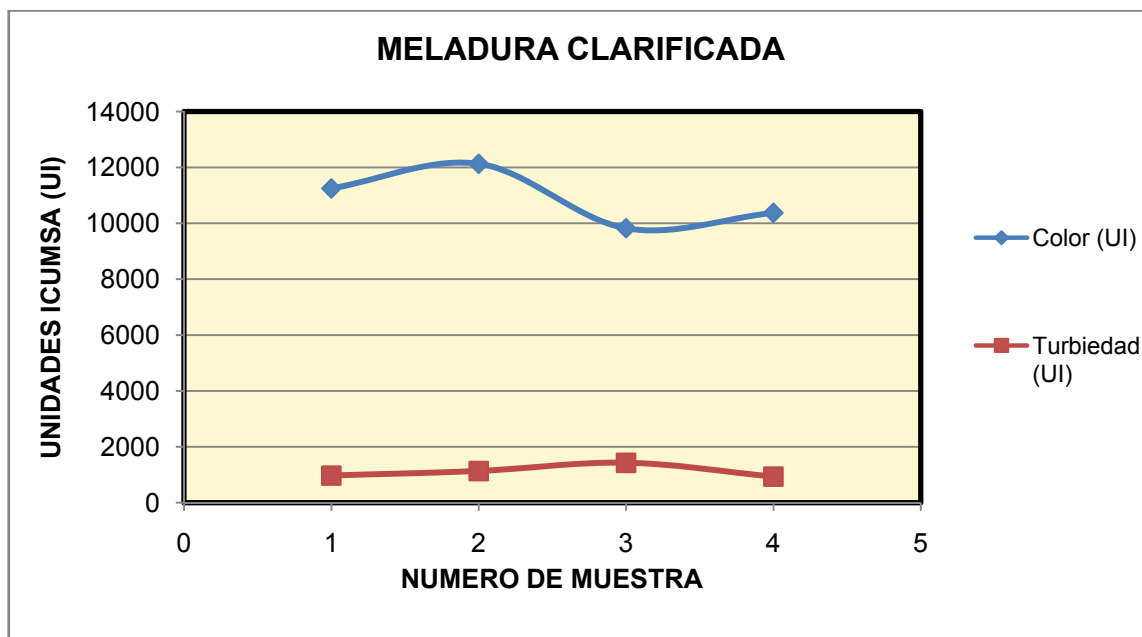
MELADURA SIN CLARIFICAR				MELADURA CLARIFICADA				
pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)	pH	° Brix	Color (UI)	Turbiedad (UI)	Residual de H ₂ O ₂ (mg/L)
6.04	64.21	10257.94	2559.52	7.75	47.11	11250	972.22	0
6.16	46.71	11111.11	1567.46	7.14	49.89	12133.07	1135.03	0
6.2	48.96	9823.87	1624.27	6.28	48.75	9823.87	1428.57	0
6.26	46.16	10176.12	1565.56	7.45	43.83	10376.98	932.54	0
PROMEDIO		10342.26	1829.2025	PROMEDIO		10895.98	1117.09	0
DESV. ESTANDAR		546.068	487.63972	DESV. ESTANDAR		1012.341	225.379423	0

Grafico 8. Variación de color y turbiedad de meladura cruda



El tipo de material durante esta parte de la prueba arrojó datos de color dentro de un rango de 9800 a 11200 UI.

Grafico 9. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada

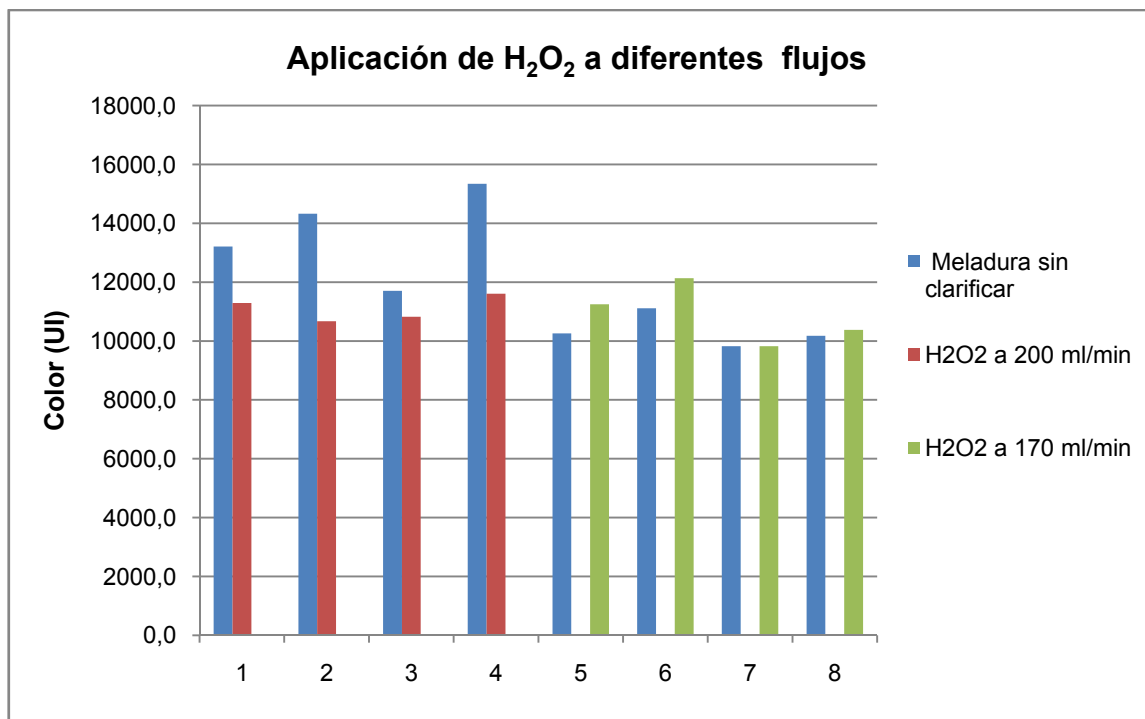


Los datos de color en la meladura clarificada con peróxido de hidrogeno están dentro de un rango de 9800 a 12200 UI. Demostrando así que el flujo calculado para esta parte de la prueba no dio resultado, ya que los datos de meladura clarificada son iguales y en algunos casos mayores a los datos de color de meladura sin clarificar. De esta forma se comprueba que dicho flujo no es suficiente para reaccionar con un caudal de meladura aproximado de 66 m³/h, y el producto posiblemente se descompone antes de realizar un proceso mínimo de clarificación.

Tabla 12. Cuadro comparativo de la efectividad del Peróxido de Hidrogeno a diferentes dosificaciones en la meladura.

Prueba #1			Prueba #2		
Muestra No.	Meladura sin clarificar	Dosificación 200 ml/min	Muestra No.	Meladura sin clarificar	Dosificación 170 ml/min
1	13209,4	11289,7	5	10257,94	11250
2	14324,0	10673,0	6	11111,11	12133,07
3	11706,0	10822,0	7	9823,87	9823,87
4	15342,5	11604,7	8	10176,12	10376,98
Promedio	13645,5	11097,3	Promedio	10342,26	10895,98

Grafico 10. Esquema comparativo de la efectividad del H₂O₂ a diferentes flujos.



En el gráfico 10, observamos la capacidad de remoción de color del H₂O₂ en la meladura. De esta manera es posible determinar el flujo óptimo de producto que se debe aplicar sobre el material para obtener la mayor cantidad de unidades de color removidas.

En el Ingenio Rio Paila consumen entre 8 y 9 toneladas mensuales de Peróxido de Hidrógeno para un flujo de meladura de 45 ton/h. La dosificación óptima es mayor de 196 g/min para una remoción de color en el licor que inicialmente este entre 600-800 UI llevarlo hasta 200 UI para azúcar refinada.

Tabla 13. Datos de sacarosa y pureza en meladura

Muestra No.	Meladura sin clarificar		Meladura clarificada	
	% Sacarosa	Pureza	% Sacarosa	Pureza
1	10.55	0.874	9.84	0.878
2	10.38	0.887	10.98	0.873
Promedio	10.47	0.881	10.41	0.875
Desv. Est.	0.12	0.009	0.81	0.004

Los valores para porcentaje de sacarosa y pureza continúan siendo muy similares indicando así que no hubo alteración al material que pudiese afectar el proceso.

Tabla 14. Datos de color, turbiedad y cenizas en azúcar crudo

COLOR(U.I.)	TURB.(U.I.)	CENIZAS(%)
286	76	0.045

Los datos obtenidos de analizar el azúcar crudo que se produjo luego de la clarificación de meladura adicionando peróxido de hidrogeno se resumen en una sola muestra puntual al final de la prueba. Estos datos son bastante positivos frente a los promedios de meses anteriores, dando más pruebas de la capacidad de remoción del producto.

Tabla 15. Cuadro comparativo de métodos de clarificación de meladura.

PARAMETRO DE EVALUACIÓN	PROCESO DE SULFITACIÓN	APLICACIÓN DE PERÓXIDO DE HIDROGENO 50% wt
Toxicidad	SO ₂ irritante en concentraciones > 3ppm	Líquido irritante al contacto con el cuerpo humano y fuertemente oxidante
Seguridad	Debe ser cuidadosamente manejado. Los vapores son irritantes y el calor del horno es muy alto	Evitar el contacto directo con la piel, ojos y mucosas. Riesgo de ignición de incendio al contacto con madera y fibras
Estabilidad	Gas estable. Al contacto con humedad permite la formación de Ácido Sulfúrico	Se descompone fácilmente en oxígeno y vapor de agua al entrar en contacto con metales, al estar sometido a calor o rayos UV.
Contaminación	El equipo no es totalmente aislado generando vapores, una cantidad pequeña es liberada a la atmósfera como residuo	La aplicación es directa evitando su contacto con el ambiente. En caso de fuga se controla con agua.
Aplicación	Bombeado en contracorriente a la meladura dentro de una torre de sulfitación	El producto es bombeado directamente desde el envase hacia el tanque de reacción donde es mezclado con la meladura antes de entrar al clarificador
Tipo de montaje	Horno rotatorio, tubería con camisa de enfriamiento, torre de sulfitación	Bomba peristáltica, tubería de material especialmente resistente a materiales oxidantes
Cantidad empleada (8 horas)	2 Sacos de 50 Kilogramos de Azufre granulado	2 tambores de 72 Kilogramos de H ₂ O ₂ líquido
Remoción de color	1344,97 UI	2548,2 UI
Residual	0,0122 ppm	0 ppm
Costos (8 horas)	\$ 55.000	\$ 392.400
Costo por unidad de color removida	\$ 4,10	\$ 15,40

7. CONCLUSIONES

- Se realizó una evaluación comparativa de dos métodos de clarificación de meladura. El método convencional produjo los resultados que normalmente se observan frente a varios tipos de material teniendo en cuenta que diariamente llega caña al Ingenio Risaralda con algunas diferencias en sus características, pero estos datos sirvieron de base para determinar que tan efectivo llegó a ser el peróxido de hidrógeno.
- En la primera parte de la prueba se comprobó que el flujo de peróxido de hidrógeno dosificado a 200 ml/min hacia la meladura fue muy acertado ya que se observaron resultados con alta eficiencia de remoción.

En la segunda parte de la prueba se redujo el flujo de dosificación de peróxido de hidrógeno a 170 ml/min, con el fin de determinar el punto exacto de dosificación del producto y con esto economizar un poco. Los datos observados fueron poco alentadores ya que el proceso no mostró cambio alguno y en algunos casos aumentó el color que era principalmente lo que se buscaba reducir. Con esto solo hubo pérdidas de dinero y de producto.

- Se buscó demostrar las ventajas de ambos productos y de igual forma sus desventajas.
En el Ingenio Risaralda la mayor ventaja de la sulfitación continua es el buen resultado que ha dado el método a lo largo de los años, además de la economía frente a otros métodos menos efectivos. Aunque las desventajas continúan afectando como incrustaciones en tuberías y calentadores, riesgo de exposición a vapores de azufre y emisiones de gases de SO_2 a la atmósfera, el sistema ha sido efectivo en el objetivo de remoción de color con una relación costo-beneficio razonable.
- Las ventajas del peróxido de hidrógeno a corto plazo son: la desinfección reconocida por la naturaleza del producto, la efectiva clarificación pero con dosificación acertada, bajo o nulo residual de producto asegurando un azúcar más blanco durante más tiempo, no contamina el medio ambiente ya que este producto se descompone en oxígeno y agua, no es tóxico para la salud humana, aunque su manipulación debe ser cuidadosa para evitar quemaduras. A largo plazo se podría esperar la disminución de incrustaciones en tuberías y calentadores aumentando el rendimiento de estos equipos.

La mayor desventaja y la razón principal por la que se decidió no utilizar el peróxido de hidrogeno fue similitud en la remoción de color de la meladura comparado con el SO₂ y finalmente el precio del producto es seis veces mayor que el precio del azufre, por esta razón para validar el producto este debería haber tenido una remoción de color de mínimo tres veces con respecto a la remoción de color al utilizar azufre.

Producto	Presentación	Precio	Cantidad necesaria cada 8 horas	Total
Azufre granulado	Saco de 50 Kg	\$27,500	2	\$55,000
Peróxido de Hidrogeno 50%	Tambor de 72 Kg	\$196,200	2	\$392,400

8. RECOMENDACIONES

- Programar una nueva prueba en planta con el producto, aunque la anterior presento dificultades en cuanto al montaje se obtuvo una base acertada de trabajo, la cual seguramente dará buenos resultados si es realizada de forma idónea ya que conclusiones finalmente no son posibles de determinar con una sola prueba.
- La asesoría fue relativamente poca y corta, ya que los proveedores debían desplazarse desde otra ciudad y por esto se perdió mucho tiempo antes de la prueba.
- Es necesario tener en cuenta factores positivos del producto, evitando enfocarse principalmente en su costo, ya que esto no permite evidenciar los resultados obtenidos.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. HONIG, Pieter. Principios de tecnología azucarera. Tomo 1. Editorial Continental S.A. 1969. Pág. 205-217,234,299,323,344
2. SPENCER – MEADE. Manual del Azúcar de Caña. Novena Edición. Montaner y Simón S.A. Barcelona 1967. Pág. 124-128
3. <http://oau.colnodo.apc.org/nivel3.php?indicador=CSO2BA&observ=5>
4. <http://www.monografias.com/trabajos29/nivel-ruido/nivel-ruido.shtml>
5. <http://www.panreac.com/new/esp/fds/ESP/X141164.htm>
6. <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/azufre/oxidos-azufre>
7. <http://www.prodigyweb.net.mx/degcorp/Quimica/Azufre.htm>
8. <http://www.textoscientificos.com/quimica/inorganica/oxigeno/compuestos>
9. http://www.blancon.net/Content/IAQ_services_desinfectairsmellmold_c.htm
10. www.quiminet.com.mx
11. http://es.wikipedia.org/wiki/Per%C3%B3xido_de_hidr%C3%B3geno
12. http://www.oxidial.com.ar/es/productos/tiras-reactivas/deteccion-de-residual-de-peroxido_B.2.12.html
13. http://www.sica.gov.ec/cadenas/azucar/docs/proceso_produccion.html
14. <http://www.perafan.com/ea02azuc.html>
15. MUÑOZ MAZO, Luz Fernanda. Estudio del sistema de sulfitación de jugo en el Ingenio Risaralda. Tesis de grado para optar al título de Química Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. 2005.
16. Manual de pruebas y ensayos para la producción de azúcar. Ingenio Risaralda S.A.